



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CHASIS DE UN FÓRMULA SAE ELÉCTRICO
BAJO CARGAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: JUAN SEBASTIÁN GONZÁLEZ CABRERA
ANTHONY JOSHEP YANEZ VEGA
TUTOR: ING. ADRIÁN XAVIER SIGÜENZA REINOSO, MSC.

Cuenca - Ecuador
2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN.**

Nosotros, Juan Sebastián González Cabrera con documento de identificación N° 0105942544 y Anthony Joshep Yanez Vega con documento de identificación N° 0706587821; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 02 de febrero del 2025

Atentamente,



Juan Sebastián González Cabrera

0105942544



Anthony Joshep Yanez Vega

0706587821

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACION A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Juan Sebastián González Cabrera con documento de identificación N° 0105942544 y Anthony Joseph Yanez Vega con documento de identificación N° 0706587821, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis estructural del chasis de un fórmula SAE eléctrico bajo cargas estáticas y dinámicas mediante elementos finitos”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 02 de febrero del 2025

Atentamente,

Juan Sebastián González Cabrera

0105942544

Anthony Joshep Yanez Vega

0706587821

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Adrián Xavier Sigüenza Reinoso con documento de identificación N° 0103827366, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CHASIS DE UN FÓRMULA SAE ELÉCTRICO BAJO CARGAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS, realizado por Juan Sebastián González Cabrera con el documento de identificación N° 0105942544 y Anthony Joseph Yáñez Vega con documento de identificación N° 0706587821, obteniendo como el resultado final el trabajo de titulación bajo opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 02 de febrero del 2025

Atentamente,



Ing. Adrián Xavier Sigüenza Reinoso, MSC.

0103827366

DEDICATORIA

El presente proyecto quisiera dedicarles con todo mi cariño, agradecimiento y amor a mis padres, Juan González y Diana Cabrera, quienes han creído en mí y me han ofrecido el apoyo incondicional y todo lo necesario para que pueda cumplir con mi objetivo de ser profesional.

De la misma manera le dedico a todas las personas especiales para mí que son mis hermanas Tere y Karli y a mi abuelo Luchi por apoyarme y hacerme sentir uno de los amores más puros y sinceros que un hermano y nieto puede recibir.

Así mismo quiero dedicar a mi Sami, que estuvo a mi lado todos estos años y otorgándome todo el amor posible haciéndome capaz de aguantar todas las dificultades.

Juan Sebastián González Cabrera

DEDICATORIA

El presente proyecto es dedicado con todo el amor del mundo, a mis padres, Yessenia Vega y Jose Yanez, quienes ha sido un pilar fundamental en mi crecimiento personal y académico, y que ahora ven como el resultado de su trabajo, malas noches y cansancio a su hijo transformarse en un profesional. Además, quisiera dedicar a mis abuelas, Cristina Cochancela y Elena Olaya por el apoyo incondicional, la paciencia, la sabiduría, el cariño, los abrazo que han estado en cada etapa de mi vida.

De la misma manera, este logro va dedicado para mis tíos, en especial a mi nanito Danny Vega y Giomar Yanez por el apoyo, disposición y ayuda incondicional en mi carrera universitaria.

Finalmente, mis amadas hermanas Milita y Angie, mi hermano Joshep Vera, para el gordo Ethiam, a mis amigos Roger Soriano, Alex Ordoñez, David Dávila, gracias totales.

Anthony Joshep Yanez Vega

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre Diana por ser la mujer que hizo que me convierta en el hombre que soy hoy en día, por estar siempre a mi lado, por apoyarme en lo posible y en lo imposible y por todas esas razones es a la persona que le dedico con todo mi corazón esto.

Igualmente agradecer a mi prima Anita y mi tía Cris por apoyarme en todo momento, siempre tenerme en cuenta y quererme de una manera tan grande que es gratificante poder llamarles familia.

Y por último agradezco de todo corazón a mis amigos que han sido un factor importante en el trayecto universitario, Cristian, Esteban, Richi, Alejo, Daniel, David, Axl y Mateo agradecerles por hacer que este tiempo sea mucho más agradable estando junto a su lado.

Juan Sebastián González Cabrera

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecer a Dios por haberme permitido llegar a estas instancias de mi vida, en el recorrido académico, personal y por entregarme la capacidad de solucionar los problemas que se han hecho presente en mi vida, la paciencia y la calma.

A mis padres, por entregarme el cariño, paciencia, conocimiento y amor para desarrollarme como una buena persona siendo un gran ejemplo de inspiración, fuerza y liderazgo.

Agradezco con mis abuelitas por todo el cariño que me han hecho experimentar, por todas las anécdotas buenas y malas, y un sin número de halagos.

Gracias Luco.

Anthony Joshep Yanez Vega

RESUMEN

En el presente proyecto busca rediseñar la estructura tubular del vehículo Formula SAE eléctrico que pertenece a la Universidad Politécnica Salesiana, con el objetivo de evaluar si esta estructura resiste el aumento de peso derivado del cambio del tren de potencia, que añade 150 kilogramos adicionales. El primer capítulo radica en realizar una profunda investigación bibliográfica sobre normativas que regulen chasis o estructuras tubulares, identificar variables y metodologías sobre el análisis estructural, y determinar qué tipo de cargas y fuerzas actúan sobre la estructura a estudiar.

El segundo capítulo, aplicaremos ingeniería inversa para recrear la estructura tubular, el primer paso del proceso será la medición y documentación de las dimensiones clave del chasis, el segundo paso será identificar el material utilizado en la estructura tubular e investigar sus características mecánicas.

El tercer capítulo, se procede a recrear la estructura tubular en tres dimensiones (3D) mediante un software CAD seleccionado. En este proyecto, la estructura será modelada con Autodesk Inventor 2024, para luego iniciar el análisis numérico mediante el método de elementos finitos en software CAE ANSYS. En esta etapa, se realizará el mallado de la estructura, aplicación de cargas y simulación computacional.

Finalmente, con los resultados obtenidos de la simulación computacional, se procede a modificar la estructura tubular mediante el uso de técnicas de optimización, evitando el aumento excesivo del peso. Con los resultados obtenidos, se propone un diseño que cumpla con el objetivo de soportar el aumento de peso, mediante la discusión de los resultados de las optimizaciones realizadas.

Palabras clave: Rediseño, Estructura tubular, Análisis estructural, Optimización.

ABSTRACT

In this project, we seek to redesign the tubular structure of the electric Formula SAE vehicle belonging to the Salesian Polytechnic University, with the aim of evaluating whether this structure can withstand the increase in weight resulting from the change in the power train, which adds an additional 150 kilograms. The first chapter will focus on conducting in-depth bibliographic research on regulations governing tubular chassis or structures, identifying variables and methodologies for structural analysis, and determining what type of loads and forces act on the structure to be studied.

In the second chapter, we will apply reverse engineering to recreate the tubular structure. The first step of the process will be the measurement and documentation of the key dimensions of the chassis. The second step will be to identify the material used in the tubular structure and investigate its mechanical characteristics.

In the third chapter, we will recreate the tubular structure in three dimensions (3D) using selected CAD software. In this project, the structure will be modeled with Autodesk Inventor 2024, and then the numerical analysis will begin using the finite element method in CAE ANSYS software. At this stage, the structure will be meshed, loads applied and computer simulation will be carried out.

Finally, with the results obtained from the computer simulation, the tubular structure is modified by using optimization techniques, avoiding excessive weight increase. With the results obtained, a design is proposed that meets the objective of supporting the increase in weight, through discussion of the results of the optimizations carried out.

Keywords: Redesign, Tubular structure, Structural analysis, Optimization.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	10
AGRADECIMIENTO	10
RESUMEN	10
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUCCIÓN	12
2. PROBLEMA	13
2.1 Antecedentes	13
2.2 Importancia y Alcances	13
2.3 Delimitación	14
3. OBJETIVOS.....	14
3.1 Objetivo General	14
3.2 Objetivo Específicos.	14
4. FUNDAMENTOS TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	14
4.1 Formula SAE.	15
4.2 Reglamento Formula SAE (Chasis).....	15
4.2.1 Artículo 3: Cabina del conductor.....	15
4.2.2 T3.2 Requisitos generales.....	16
4.2.3 Arco frontal.....	17
4.2.4 Requisitos generales de los arcos antivuelco	19
4.4.4 Refuerzos del arco frontal.....	22
4.4.5 Apertura de la cabina.....	24
4.4.6 Sección interna de la cabina	25
4.3 El Chasis.....	25
4.3.1 Chasis Tubular	26
4.3.2 Chasis monocasco	27
4.3.3 Chasis híbrido	28
4.4 Características de un chasis para competencia Formula SAE	28
4.5 Materiales.	29
4.5.1 Acero SAE 4130.....	29
4.5.2 Acero SAE 1010.....	29
4.5.3 Acero SAE 1020.....	30
4.6 Componentes que se acoplan al chasis	30
4.7 Diseño.	32
4.8 Rediseño.....	34
4.9 Métodos para dimensionamiento de un chasis.....	35

4.9.1 Ingeniería inversa.....	35
4.9.2 Escaneo laser 3D.....	36
4.9.3 Medición manual.....	40
4.10 Consideraciones de diseño.....	41
4.11 Análisis numérico.....	41
4.11.1 Tipo Shell.....	42
4.11.2 Tipo Beam.....	43
4.12 Cargas aplicadas.....	43
4.12.1 Torsión Longitudinal.....	43
4.12.2 Horizontal Lozanging.....	44
4.12.3 Flexión Lateral.....	44
4.12.4 Flexión Vertical.....	44
4.12.5 Estimación de cargas.....	44
5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE DIMENSIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL.....	46
5.1 Ingeniería Inversa aplicada.....	46
5.2 Introducción al proceso de medición.....	46
5.2.1 Secciones de medición.....	52
5.2.2 Mediciones angulares.....	59
5.2.3 Mediciones longitudinales y transversales.....	66
5.3 Instrumentos y complementos de medición.....	73
5.3.1 Instrumentos.....	73
5.3.2 Estructura de fijación para instrumento de medición.....	76
5.4 Estadística descriptiva de las mediciones.....	84
5.4.1 Análisis estadístico de las mediciones angulares.....	84
5.4.2 Análisis estadístico de las mediciones longitudinales.....	87
5.4.3 Análisis estadístico de las mediciones transversales.....	88
5.5 Materiales.....	89
5.6 Conclusión de la Ingeniería Inversa.....	90
6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE METODOLOGÍA CAD-CAE.....	97
6.1 Cálculo de cargas presentes en la estructura.....	97
6.1.2 Transferencia de masa lateral.....	98
6.1.3 Transferencia de masa longitudinal y frenado.....	104
6.2 Análisis elementos finitos.....	108
6.2.1 Convergencia de malla.....	108
6.2.2 Análisis preliminar por elementos finitos estructura original.....	110

6.2.4 Análisis por elemento finitos con la estructura modificada.	127
6.3 Diseño Optimizado del Chasis: Selección de Material y Grosor del Tubo.	146
6.4 Análisis de resultado.	154
7. Conclusiones.	162
8. Recomendaciones.	163
9. Bibliografía.	164

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Medidas de seguridad de arcos antivuelco.....	20
Figura 2. Esquema percentil 95.	21
Figura 3. Soportes del arco principal.	22
Figura 4. Estructura de impacto lateral.	23
Figura 5. Plantilla de espacio de cabina.....	24
Figura 6. Plantilla de espacio de cabina interna.	25
Figura 7. Chasis Tubular.	27
Figura 8. Chasis Monocasco.	27
Figura 9. Chasis Híbrido.....	28
Figura 10. Diseño de chasis.	32
Figura 11. CAM para componentes automotrices.....	33
Figura 12. Flujograma de Ingeniería inversa con escaneo 3d.....	35
Figura 13. Flujograma de escaneo 3D.	36
Figura 14. Escaneo 3d de componente automotriz.....	39
Figura 15. Flujograma de metrología.	40
Figura 16. Mallada de estructura.	42
Figura 17. Método tipo Shell.	42
Figura 18. Método tipo Beam.	43
Figura 19. Flujograma del proceso general de medición.....	47
Figura 20. Nivelación del chasis.....	49
Figura 21. Limpieza del chasis.	49
Figura 21. Mecanizado del chasis.	50
Figura 22. Seccionamiento del chasis.....	51
Figura 23. Delimitación de la sección 1.	52
Figura 24. Registro de tubos vista perfil izquierdo.	53
Figura 25. Registro de tubos vista derecha.	54
Figura 26. Delimitación de la sección 2.	55
Figura 27. Registro de tubos vista perfil derecho.	56
Figura 28. Registro de tubos vista izquierda.....	56
Figura 29. Delimitación de la sección 2.	57
Figura 30. Registro de tubos vista perfil derecho.	57
Figura 31. Registro de tubos vista perfil derecho.	58
Figura 32. Flujograma preparación y medición del chasis.....	59
Figura 33. Registro de ángulos vista frontal.	60

Figura 34. Registro de ángulos vista derecha.	60
Figura 35. Registro de ángulos vista izquierda.	61
Figura 36. Registro de ángulos vista derecha.	61
Figura 37. Registro de ángulos vista superior.	62
Figura 38. Registro de ángulos vista izquierda.	63
Figura 39. Registro de ángulos vista derecha.	63
Figura 40. Registro de ángulos vista superior.	64
Figura 41. Registro de ángulos vista izquierda.	65
Figura 42. Registro de ángulos vista derecha.	65
Figura 43. Ubicación de longitud en la sección 1.	67
Figura 44. Ubicación de longitud en la sección 2.	68
Figura 45. Ubicación de longitud en la sección 3.	68
Figura 46. Atenuador de impacto frontal.	71
Figura 47. Ancho entre soporte lateral.	71
Figura 48. Ancho de arco frontal.	72
Figura 49. Anchos del arco principal.	72
Figura 50. Ancho de la estructura para suspensión trasera.	73
Figura 51. Instrumento de medición.	74
Figura 52. Medidor de distancia laser.	75
Figura 53. Inclinómetro con base magnética.	76
Figura 54. Anclaje para el chasis.	78
Figura 55. Soporte del medidor de distancia.	78
Figura 56. Estructura de fijación para medidor de distancia.	79
Figura 57. Posición del medidor de distancia.	80
Figura 58. Nivelación del medidor de distancia.	80
Figura 60. Soporte para panel de referencia.	81
Figura 61. Anclaje para panel de referencia.	81
Figura 62. Anclaje de referencia posterior.	82
Figura 63. Estructura de referencia.	82
Figura 64. Base para fijación geometría suspensión trasera.	83
Figura 65. Configuración para medir profundidad.	83
Figura 66. Configuración para medir ancho.	84
Figura 67. Resultados obtenidos sección 1.	85
Figura 68. Resultados obtenidos sección 2.	86
Figura 69. Resultados obtenidos sección 3.	86
Figura 70. Resultados obtenido sección 1.	87

Figura 71. Resultados obtenido sección 2.	87
Figura 72. Resultados obtenido sección 3.	88
Figura 73. Resultados obtenidos del atenuador de impacto frontal.	88
Figura 74. Resultados obtenidos del arco frontal.	88
Figura 75. Resultados obtenidos del arco principal.	89
Figura 76. Resultados obtenidos estructura de la suspensión trasera.	89
Figura 77. Vista frontal del atenuador de impacto en software CAD.	91
Figura 78. Atenuador de impacto en software CAD.	93
Figura 79. Sección 1 en software CAD.	94
Figura 80. Defecto desde AS1_21 hasta AS1_26.	96
Figura 81. Protecciones laterales.	97
Figura 82. Transferencia de masa lateral.	101
Figura 83. Transferencia de masa longitudinal.	106
Figura 84. Gráfica de convergencia del mallado.	109
Figura 85. Esfuerzos equivalentes del chasis original primera simulación.	110
Figura 86. Deformación del chasis original de la primera simulación.	111
Figura 87. Coeficiente de seguridad del chasis original de la primera simulación.	111
Figura 88. Esfuerzos equivalentes del chasis original del segundo análisis.	112
Figura 89. Deformación del chasis original del segundo análisis.	112
Figura 90. Coeficiente de seguridad del chasis original del segundo análisis.	112
Figura 91. Esfuerzos equivalentes del chasis original del tercer análisis.	113
Figura 92. Deformación del chasis original del tercer análisis.	113
Figura 93. Coeficiente de seguridad del chasis original del tercer análisis.	114
Figura 94. Esfuerzos equivalentes del chasis original del cuarto análisis.	114
Figura 95. Deformación del chasis original del cuarto análisis.	115
Figura 96. Coeficiente de seguridad del chasis original del cuarto análisis.	115
Figura 97. Esfuerzos equivalentes del chasis original de la primera simulación.	116
Figura 98. Deformación del chasis original de la primera simulación.	116
Figura 99. Coeficiente de seguridad del chasis original de la primera simulación.	117
Figura 100. Esfuerzos equivalentes del chasis original del segundo análisis.	117
Figura 101. Deformación del chasis original del segundo análisis.	118
Figura 102. Coeficiente del chasis original del segundo análisis.	118
Figura 103. Esfuerzos equivalentes del chasis original del tercer análisis.	119
Figura 104. Deformación del chasis original del tercer análisis.	119
Figura 105. Coeficiente de seguridad del chasis original del tercer análisis.	120
Figura 106. Esfuerzos equivalentes del chasis original del cuarto análisis.	120

Figura 107. Deformación del chasis original del cuarto análisis.	121
Figura 108. Coeficiente de seguridad del chasis original del cuarto análisis.	121
Figura 109. Esfuerzos equivalentes del chasis original de la primera simulación.	122
Figura 110. Deformación del chasis original de la primera simulación.	122
Figura 111. Coeficiente de seguridad del chasis original de la primera simulación.	122
Figura 112. Esfuerzos equivalentes del chasis original del segundo análisis.	123
Figura 113. Deformación del chasis original del segundo análisis.	123
Figura 114. Coeficiente del chasis original del segundo análisis.	124
Figura 115. Esfuerzos equivalentes del chasis original del tercer análisis.	125
Figura 116. Deformación del chasis original del tercer análisis.	125
Figura 117. Coeficiente de seguridad del chasis original del tercer análisis.	125
Figura 118. Esfuerzos equivalentes del chasis original del cuarto análisis.	126
Figura 119. Deformación del chasis original del cuarto análisis.	126
Figura 120. Coeficiente de seguridad del chasis original del cuarto análisis.	127
Figura 121. Deformación del chasis modificado de la primera simulación.	128
Figura 122. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado en la primera simulación.	128
Figura 123. Coeficiente de seguridad del chasis modificado de la primera simulación.	129
Figura 124. Deformación del chasis modificado del segundo análisis.	129
Figura 125. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado del segundo análisis.	130
Figura 126. Coeficiente de seguridad del chasis modificado del segundo análisis.	130
Figura 127. Deformación del chasis modificado del tercer análisis.	131
Figura 128. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado del tercer análisis.	131
Figura 129. Coeficiente de seguridad del chasis modificado del tercer análisis.	131
Figura 130. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado del cuarto análisis.	132
Figura 131. Deformación del chasis modificado del cuarto análisis.	132
Figura 132. Coeficiente de seguridad del chasis modificado del cuarto análisis.	133
Figura 133. Deformación del chasis modificado primera simulación.	134
Figura 134. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado de la primera simulación.	135
Figura 135. Coeficiente de seguridad del chasis modificado de la primera simulación.	135
Figura 136. Deformación del chasis modificado del chasis de la segunda simulación.	136
Figura 137. Coeficiente del chasis modificado de seguridad segunda simulación.	136
Figura 138. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado segunda simulación.	137
Figura 139. Deformación del chasis modificado tercera simulación.	138
Figura 140. Coeficiente de seguridad del chasis modificado tercera simulación.	138
Figura 141. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado tercera simulación.	139
Figura 142. Deformación del chasis modificado primera simulación.	140

Figura 143. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado primera simulación.	140
Figura 144. Coeficiente de seguridad del chasis modificado primera simulación.	141
Figura 145. Deformación del chasis modificado segunda simulación.	141
Figura 146. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado segunda simulación.....	142
Figura 147. Coeficiente de seguridad del chasis modificado segunda simulación.....	142
Figura 148. Deformación del chasis modificado tercera simulación.	143
Figura 149. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado tercera simulación.....	143
Figura 150. Coeficiente de seguridad del chasis modificado tercera simulación.	144
Figura 151. Deformación del chasis del chasis modificado cuarta simulación.	144
Figura 152. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado cuarta simulación.....	145
Figura 153. Coeficiente de seguridad del chasis modificado cuarta simulación.....	145
Figura 154. Espesor de miembros estructurales.	146
Figura 155. Miembros a optimizarse.....	147
Figura 156. Registro OPTUNO.	147
Figura 157. Registro OPTDOS.	148
Figura 158. Registro OPTRES.	148
Figura 159. Registro OPTCUATRO.	149
Figura 160. Registro OPTCINCO.....	149

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Dimensiones mínimas para cada elemento.	18
Tabla 2. Composición Química Acero grado SAE 4130	29
Tabla 3. Composición Química Acero grado SAE 1010.	29
Tabla 4. Composición Química Acero grado SAE 1020	30
Tabla 5. Masas aproximadas del vehículo.	44
Tabla 6. Requisitos de análisis estructurales.	45
Tabla 7. Parámetros técnicos de inclinómetro.	74
Tabla 8. Parámetros técnicos de medidor de distancia laser.	75
Tabla 9. Propiedades Mecánicas del Acero 4130.	90
Tabla 10. Diferencia entre AS1_1 y AS1_6.	91
Tabla 11. Diferencia entre AS1_2 y AS1_3.	91
Tabla 12. Diferencia entre AS1_4 y AS1_5.	91
Tabla 13. Diferencia entre AS1_29 y AS1_30.	92
Tabla 14. Diferencia entre AS1_11 y AS1_19.	93
Tabla 15. Diferencia entre AS1_11 y AS1_19.	94
Tabla 16. Diferencia entre AS1_21, AS1_24, AS1_26.	95
Tabla 17. Diferencia entre AS1_22, AS1_23 y AS1_25.....	95
Tabla 18. Diferencia entre AS2_1, AS2_12, AS2_11 y AS2_12.....	96
Tabla 19. Velocidad para tomar una curva.....	99
Tabla 20. Velocidad propuesta para tomar una curva.....	100
Tabla 21. Aceleración centrífuga.....	100
Tabla 22. Fuerzas G calculada y propuesta.....	101
Tabla 23. Datos para el cálculo de transferencia de masa lateral.	103
Tabla 24. Masa de motores y peso total.	104
Tabla 25. Cálculo de $R1$ y $R2$	104
Tabla 27. Convergencia de malla.....	109
Tabla 28. Propiedades Mecánicas del Acero 4130.	150
Tabla 29. Propiedades Mecánicas del Acero 1010.	150
Tabla 30. Propiedades Mecánicas del Acero 1020.	150
Tabla 31. Optimización para rigidez torsional de miembros estructurales.	151
Tabla 32. Optimización para rigidez longitudinal de miembros estructurales.....	152
Tabla 33. Optimización para frenado de miembros estructurales	153
Tabla 34. Resultados rigidez torsional estructura original.....	154
Tabla 35. Resultados rigidez torsional estructura modificada.....	154

Tabla 36. Resultados rigidez longitudinal estructura original.....	155
Tabla 37. Resultados rigidez longitudinal estructura modificada.	155
Tabla 38. Resultados de frenado estructura original.....	156
Tabla 39. Resultados de frenado estructura modificada.....	156
Tabla 40. Cantidad y precio de Acero SAE 4130	158
Tabla 41. Cantidad y precio de Acero SAE 1010.	159
Tabla 42. Cantidad y precio de Acero SAE 1020.	160

1. INTRODUCCIÓN

El chasis constituye una estructura esencial en el diseño y funcionamiento de los vehículos, ya que funciona como el soporte principal que sostiene todos los componentes mecánicos y la carrocería, además de ser clave para la seguridad y estabilidad del automóvil. Su diseño debe cumplir con altos estándares de resistencia, rigidez y ligereza, permitiéndole soportar diversas cargas tanto en movimiento como en reposo, sin afectar la integridad estructural del vehículo. Esta investigación examina la relevancia del chasis, su influencia en la eficiencia, seguridad y desempeño, y materiales que buscan mejorar su rendimiento.

Para el análisis se debe tener en cuenta el reglamento referente al chasis con relación a la competencia Formula SAE, el material que se usa, los métodos que son usados para el dimensionamiento del chasis, tipos de análisis numéricos que son fundamentales para poder conseguir las medidas para poder recrear la forma del chasis en el software CAD.

Después de obtener toda la información se realiza la toma de medida del chasis para poder proyectarlo en el software Inventor y Ansys, una vez en Ansys se realiza el análisis por elementos finitos para así obtener las zonas críticas a las que podría existir un mayor desgaste o rupturas. Finalmente se busca optimizar el diseño buscando las zonas en peor estado y modificando su estructura.

2. PROBLEMA

En el desarrollo del proyecto sobre la modificación de la estructura tubular del fórmula SAE eléctrico debido a las modificaciones de los sistemas del vehículo tales como tren de potencia, convierten la definición de la estructura en un desafío, el problema que sucede sobre estructura original, siendo afectada a tal punto de no poder soportar las condiciones previamente establecidas. Esto genera la necesidad de llevar a cabo acciones de optimización, incrementando la robustez y rigidez de la estructura frente a la carga modificada (peso) que debe soportar.

2.1 Antecedentes

La carrera de Ingeniería Automotriz ha participado en la competencia estudiantil Fórmula S en años como 2014 en el circuito de Silverstone, en donde se puede evidenciar experiencias adquiridas por parte de los miembros, desarrollo de nuevas tecnologías referente a las competencias automovilística, revistas científicas, autoaprendizaje referente a los temas involucrados en el vehículo.

Además, existe antecedentes sobre el rediseño del chasis de tubular al FSAE BOSCO 1 nos aporta evidencia y metodología necesaria para poder abordar temas relacionados con el rediseño, modelado tridimensional y análisis numérico mediante los softwares CAD-CAE, en donde toma como punto de partida el chasis sin alguna modificación, empleando un rediseño óptimo para obtener la distribución de masas adecuadas y la estabilidad del vehículo.

2.2 Importancia y Alcances

El presente proyecto de rediseño de un chasis tubular por el aumento de peso es de suma importancia para la carrera de Ingeniería Automotriz, desarrollando una metodología que pueda ser aplicada a proyectos futuros y beneficiará al Grupo de

Investigación de Ingeniería de Transporte (GIIT), en la línea de Diseño Mecánico Automotriz y además estará dirigido a los estudiantes de la carrera que aplicarán los conocimientos adquiridos.

2.3 Delimitación

El proyecto de titulación tiene como delimitación el uso de herramientas tecnológicas capaces de acelerar el proceso de modelado en el software CAD empleado, dichas herramientas tales como escáner 3D tiene un costo de adquisición muy elevado para emplearlo en el presente estudio, para ello no limitamos a utilizar metrología en el chasis tubular y basarnos en material digital que contienen las dimensiones y geometrías

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Analizar el impacto estructural del chasis de un fórmula SAE eléctrico bajo la aplicación de cargas estáticas y dinámicas mediante el método de elemento finitos para optimizar su estructura garantizando resistencia estructural.

3.2 Objetivo Específicos.

- Establecer un marco teórico referencial de conceptos base para el estudio a través de la revisión referencias bibliográficas.
- Recopilar información de la estructura a estudiar por medio del dimensionamiento y características mecánicas de los materiales.
- Generar un análisis estructural mediante método de elementos finitos por con la ayuda de un software CAD-CAE.

4. FUNDAMENTOS TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.

4.1 Formula SAE.

La competencia SAE es un evento internacional en el que participan universidades de diversos países, orientado a la creación y diseño de un vehículo de carreras. Los equipos son evaluados en múltiples pruebas, tanto estáticas como dinámicas, por un panel de jueces que examinan distintos aspectos del vehículo.

Las pruebas estáticas buscan evaluar el diseño y reconocer las innovaciones tecnológicas, las pruebas están compuestas por: inspección técnica, fabricación, costos, diseño y presentación. Por otro lado, las pruebas dinámicas buscan evaluar la fiabilidad del vehículo analizando la aceleración, skid pad, eficiencia, autocross y endurance.

Para que este vehículo pueda participar debe contar con la homologación por parte de la Formula SAE, la cual deberá cumplir con el reglamento referente al chasis.

4.2 Reglamento Formula SAE (Chasis)

En este apartado se ejecuta la traducción literal del reglamento 2017-2018 (*2017 2018 Formula SAE Rules*, 2016) en donde se exponen las partes referentes al chasis, verificando las posibles modificaciones durante la traducción. Las reglas que detallan el diseño y manufactura del bastidor se describen en la parte T artículos 3, 4, 5 y 6 del reglamento. Se citan las normas de mayor relevancia en el desarrollo del chasis.

Parte T – Requisitos técnicos generales

4.2.1 Artículo 3: Cabina del conductor

T3.1 Estructura del vehículo – 2 Opciones

Los equipos según su disposición pueden diseñar su vehículo cumpliendo cualquiera de las dos alternativas por separado pero relacionadas en los requisitos

y restricciones. Los equipos pueden optar por cualquiera de las siguientes opciones:

- a. Parte AF “Reglas alternativas del chasis” apéndice AF

4.2.2 T3.2 Requisitos generales

Entre otros requisitos, la estructura del vehículo incluye los siguientes miembros estructurales: dos arcos antivuelco reforzados, mampara delantera con una estructura de soporte, estructuras de impacto lateral y un atenuador de impactos.

T3.3 Definiciones

- a) *Arco Principal*: Miembro estructural colocado alrededor o detrás del conductor.
- b) *Arco Frontal*: Miembro estructural colocado alrededor de las piernas del conductor muy próximo al volante.
- c) *Arcos antivuelco*: Los miembros estructurales “arco principal y frontal” se clasifican como arcos antivuelco.
- d) *Soporte de los refuerzos de los arcos antivuelco*: miembros estructurales que inician en el extremo inferior de los refuerzos y terminan en los arcos antivuelco.
- e) *Miembro del bastidor*: Es un tubo continuo sin cortes o agujeros en su parte intermedia.
- f) *Bastidor*: Es el grupo de miembros estructurales que soporta todos los sistemas del vehículo. Este ensamble puede constar de una triangulación simple descrita en este reglamento o múltiples geometrías soldadas entre sí; además, se permite la combinación de materiales compuestos y estructuras soldadas.
- g) *Estructura primaria*. - Está compuesta de los siguientes elementos del chasis:

Arco principal

4.2.3 Arco frontal

- ii. Refuerzos de los arcos y soportes.
- iii. Estructura de impacto lateral
- iv. Mampara delantera
- v. Estructura de soporte de la mampara delantera
- vi. Todos los miembros que transfieran cargas desde los cinturones de seguridad del conductor.

h) Estructura principal: La estructura que se encuentra en el interior de la circundante definida por la estructura primaria. La porción del bastidor principal sobre un plano horizontal situado en la parte superior de la barra de impacto lateral superior y el refuerzo de arco principal no se incluyen en la definición de este ítem.

i) Mampara frontal: Estructura que determina el plano frontal de la estructura principal y su función primordial es brindar protección para los pies del conductor.

j) Atenuador de impacto: Cuerpo deformable, absorbe energía colocado en frente de la mampara.

a. *Zona de impacto lateral:* Área lateral que se extiende entre los arcos antivuelco a una altura del 350mm desde el suelo.

T. *Requisitos mínimos del material*

A. Acero, material base.

La estructura primaria del auto debe ser construida de tubo de acero (0.1% carbono mínimo) de baja aleación o elevados porcentajes de carbón, perfil redondo de dimensiones mínimas especificadas en la tabla 1 o aprobar las alternativas de las reglas T3.5, T3.6 Y T3.7.

Tabla 1. Dimensiones mínimas para cada elemento.

ITEM O APLICACIÓN	DIMENSIÓN EXTERNA POR ESPESOR DE PARED
Arcos antivuelco Barra de cinturón de seguridad a la altura de hombros	Redondo 1plg (25,40 mm) x 0,095 plg (2,4 mm) Redondo 25 mm x 2,5 mm
Mampara frontal refuerzos de arcos Estructura de impacto lateral Sujeciones de arnés del conductor EV: estructura de protección de baterías de alto voltaje	Redondo 1 plg (25,4 mm) x 0,065 plg (1,65mm) Redondo 25 mm x 1,75 mm Redondo 25,4 mm x 1,6 mm Cuadrado 1 plg x 1 plg x 0,047 plg Cuadrado 25 mm x 25 mm x 1,2mm
Estructura de soporte para refuerzos del arco principal Estructura de soporte para la mampara frontal Brazos de la barra de cinturón de seguridad EV: componentes de protección del tren de fuerza motriz	Redondo 1 plg (25,4 mm) x 0,047 plg (1,2 mm) Redondo 25 mm x 1,5 mm Redondo 26 mm x 1,2 mm
Miembro superior curvado de la estructura de impacto lateral	Redondo 1,375 plg (35 mm) x 0,047 plg (1,2 mm)

T3.4.2 La aplicación de acero aleado no posibilita el uso del espesor de la pared más delgado que el aplicado al acero dulce.

T3.4.5 Propiedades de los aceros utilizados para los cálculos en la presentación de un SES o SRCF deben ser los siguientes:

Resistencia sin soldadura para cálculos de materiales continuos:

- Módulo de Young (E): 200GPa (29,000 ksi)
- Resistencia a la cedencia (S_y): 305 MPa (44.2 ksi)
- Resistencia última (S_u): 365 MPa (52,9 ksi)

Resistencia con soldadura para materiales discontinuos como cálculos en juntas:

- Resistencia a la cedencia (S_y): 180 MPa (26 ksi)
- Resistencia última (S_u): 300MPa (43.5 ksi)

4.2.4 Requisitos generales de los arcos antivuelco

T3.10.3 EL casco de todos los pilotos del equipo sentados en posición normal de conducción, utilizando los cinturones de seguridad y considerando un percentil 95 masculino (datos antropométricos), deberá cumplir:

- a) El casco del conductor debe estar a un mínimo de 50,8 mm (2 plg) de la línea recta dibujada entre lo más alto de ambos arcos antivuelco (Figura 4.1a).
- b) El casco se ubica a un mínimo de 50,8mm (2 plg) de la línea recta dibujada entre la porción más alta del arco principal y el extremo inferior de los refuerzos del arco, si los mismos se extienden hacia atrás (Figura 4.1b).

- a. Si los refuerzos del arco principal se extienden hacia delante, el casco no debe atravesar la superficie posterior del arco principal (Figura 4.1c)

Figura 1. Medidas de seguridad de arcos antivuelco

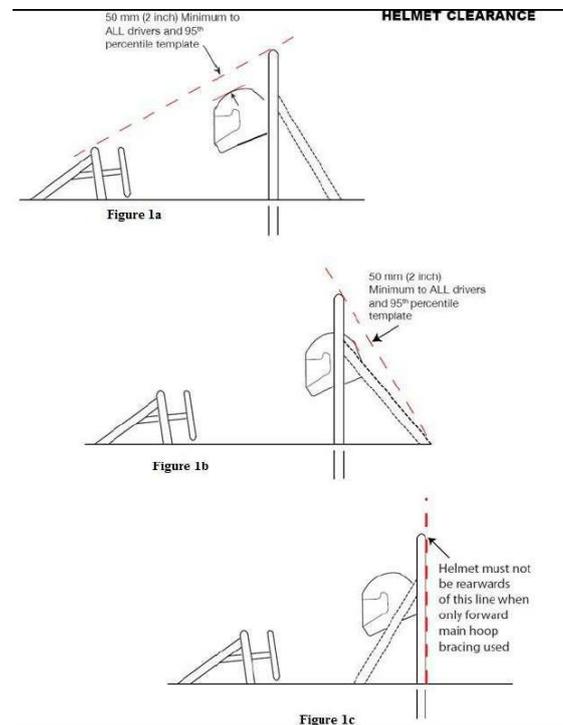


Figura 4.1 Medidas de seguridad de arcos antivuelco [1]

T3.10.4 La plantilla del percentil 95 masculino se colocará como se indica a continuación en la figura 4.2:

- El asiento se acoplará a la posición más retrasada.
- Los pedales se ajustan hacia adelante.
- El círculo de 200 mm que representa la cadera se coloca en la parte más baja del asiento formando una distancia de 915 mm desde el centro del círculo hasta la cara posterior de los pedales.
- El círculo de en medio de 200 mm que emula los hombros se posiciona en el respaldo del asiento.

- a. El círculo de 300 mm se ubica a una distancia máxima de 25,4 mm desde el reposacabezas.

Figura 2. Esquema percentil 95.

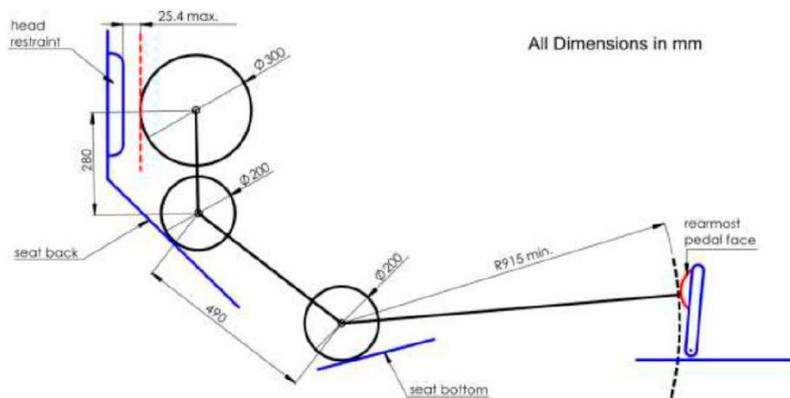


Figura 4.2 Esquema percentil 95 [1]

T3.10.7 El radio mínimo medido desde el centro del tubo en todas las curvas del chasis debe ser tres veces el diámetro exterior. Las curvaturas de los tubos deben ser suaves y continuas sin presencia de fallos en la pared.

T3.13. Refuerzos del arco principal

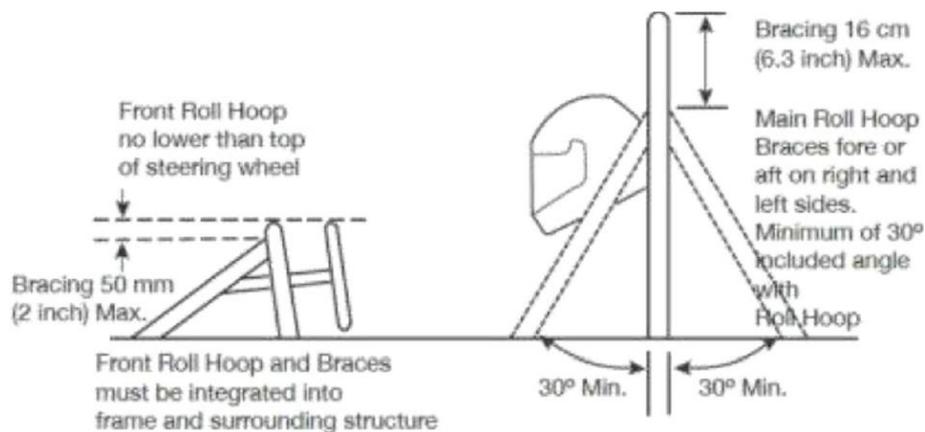
T3.13.1 Los refuerzos deben ser construidos de tubería de acero de sección cerrada acorde al artículo T3.4.1

T3.13.2 El arco antivuelco principal es apoyado por dos tirantes que se extienden hacia atrás y hacia adelante en ambos lados (izquierda y derecha) del arco.

T3.13.3 En la vista lateral del vehículo los refuerzos no deben alcanzar la parte más alta del arco principal, de tal manera que si el arco principal se inclina hacia atrás, los refuerzos se colocan por detrás del arco principal y si este se inclina hacia delante, los refuerzos se colocan hacia delante.

T3.13.4 Los soportes del arco principal deben colocarse muy próximos a la porción más alta del arco principal, pero los soportes pueden ubicarse hasta 160 mm bajo la superficie más alta del arco. El ángulo mínimo formado por el arco principal y los soportes es de treinta grados (30°) como se indica en la figura 4.3.

Figura 3. Soportes del arco principal.



T3.13.7 El extremo inferior de los refuerzos, deben ser soportado de regreso al arco principal por un mínimo de dos miembros estructurales en cada lado del vehículo; un miembro inferior y un miembro superior con una apropiada configuración triangulada.

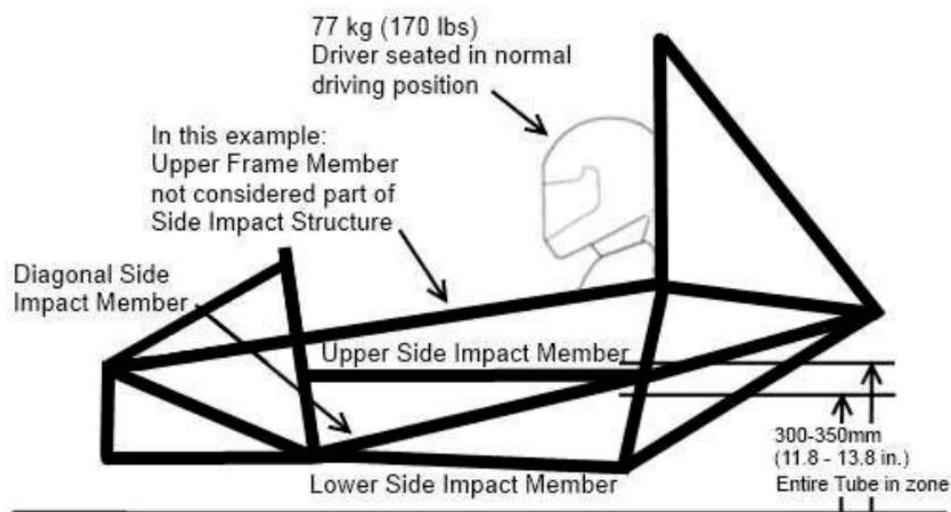
4.4.4 Refuerzos del arco frontal

T3.14.4 Los soportes del arco frontal deben colocarse muy próximos a la porción más alta del mismo, pero los soportes pueden ubicarse hasta 50,8 mm bajo la superficie más alta del arco como se muestra en la figura 4.3.

T3.24 Estructura de impacto lateral para vehículos de chasis tubular

T3.24.1 La estructura de impacto lateral debe ser diseñada de al menos tres miembros tubulares ubicados a cada lado del piloto sentado en posición de conducción normal, como se muestra en la figura 4.4.

Figura 4. Estructura de impacto lateral.



T3.24.2 Los tres miembros tubulares deben ser contruidos de material acorde a la sección T3.4.

T3.24.3 Las localizaciones requeridas de los tres miembros estructurales son las siguientes:

- a) El miembro superior conecta el arco principal y el arco frontal.
Considerando un peso de 77 kg (170 libras) del conductor sentado en posición de conducción, todo el miembro superior debe estar a una altura entre 350 mm y 300 mm sobre el suelo.
- b) El miembro inferior conecta las bases del arco principal y el arco frontal.

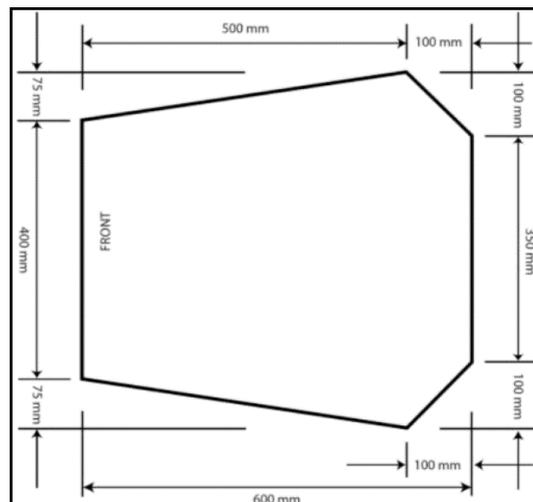
- c) El tubo diagonal conecta a los miembros superior e inferior de la estructura de impacto lateral entre los arcos principal y frontal.

Artículo 4: Cabina

4.4.5 Apertura de la cabina

T4.1.1 Con el propósito de asegurar que el acceso y el tamaño de la cabina sean los adecuados, la plantilla que se muestra en la figura 4.5 se inserta en la abertura de la cabina.

Figura 5. Plantilla de espacio de cabina.



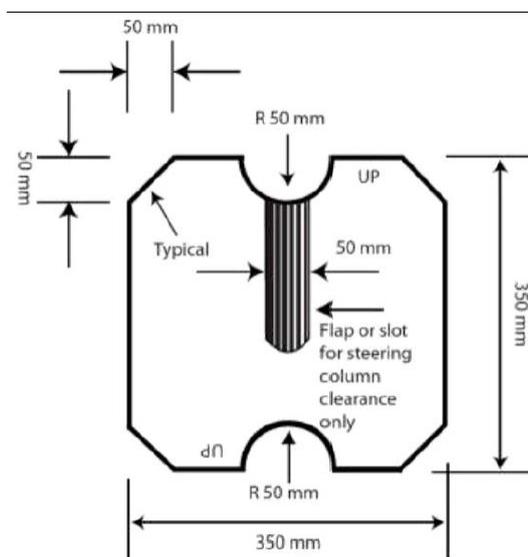
T4.1.2 La plantilla se inserta verticalmente paralela al suelo por encima de cualquier estructura principal o parte de la carrocería que se encuentren entre los arcos antivuelco hasta que haya pasado por debajo del miembro superior de la estructura de impacto lateral o 350 mm desde el suelo para chasis monocascos.

T4.1.3 Durante la prueba, el volante, la columna de dirección, asiento y todos los rellenos pueden retirarse. La palanca de velocidades o el mecanismo de cambio no se retiran al menos que estén integrados en el volante. El firewall no puede desplazarse o retirarse.

4.4.6 Sección interna de la cabina

T4.2.1 Una sección vertical que proporciona el desplazamiento de la plantilla que se observa en la figura 4.6 que se mueve horizontalmente a través de la cabina hasta 100mm antes de la superficie de los pedales en la posición inactiva. Los pedales deben estar regulados en su posición más adelantada.

Figura 6. Plantilla de espacio de cabina interna.



T4.2.2 La plantilla de espesor máximo de 7mm, se inserta de forma vertical en el interior de la cabina hacia atrás de la porción más posterior de la columna de dirección.

T4.2.3 Los únicos artículos que se pueden retirar durante la prueba son el volante y los rellenos de protección establecidos en la regla T5.8, los cuales se retiran fácilmente sin el uso de herramientas con el piloto sentado. No se puede quitar el asiento.

4.3 El Chasis.

El chasis automotriz es la estructura principal de un vehículo, cuya función es brindar soporte y rigidez a los distintos sistemas y componentes ensamblados, como el motor, la

transmisión, la suspensión, la dirección y la carrocería. Actúa como el esqueleto del vehículo, distribuyendo las cargas mecánicas que surgen durante su funcionamiento, incluyendo las fuerzas de aceleración, frenado y dinámicas al tomar una curva, además absorben los impactos provocados por colisiones o irregularidades del terreno.

Además de ofrecer soporte estructural, el chasis desempeña un papel crucial en el rendimiento dinámico del vehículo, afectando su estabilidad, maniobrabilidad y la seguridad tanto activa, como pasiva. Para cumplir estas funciones, el chasis debe cumplir con altos estándares de rigidez torsional, resistencia, capacidad de absorción de impactos en caso de accidente, y durabilidad frente a las exigencias mecánicas y ambientales.

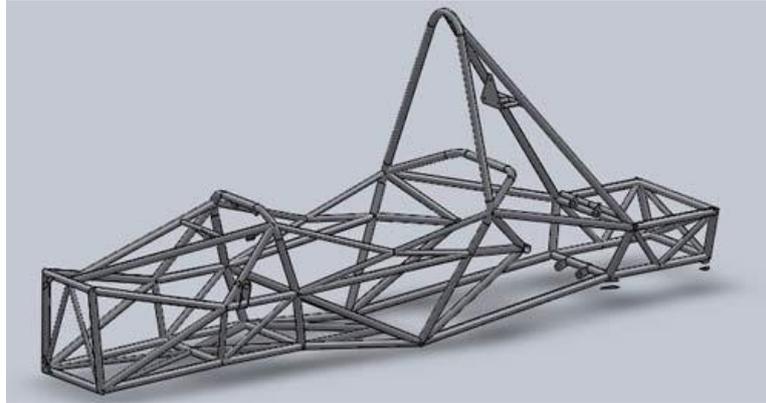
Según la normativa de competiciones FIA, Formula SAE existen tres tipos de chasis que pueden ser utilizados para el formato de fórmula SAE los cuales son, tubular, monocasco e híbrido:

4.3.1 Chasis Tubular

Es una estructura empleada principalmente en vehículos de alto rendimiento, caracterizada por el uso de tubos dispuestos en una configuración tridimensional que optimiza la rigidez torsional y la distribución de cargas. Este tipo de chasis, fabricado generalmente en acero o aleaciones ligeras, se destaca por su bajo peso y alta resistencia estructural.

El diseño tubular se basa en la triangulación de los tubos, además de su ligereza, ofrece gran flexibilidad para la integración de diversos componentes y facilita modificaciones o reparaciones rápidas.

Figura 7. Chasis Tubular.



Fuente. Pera, S. (s. f.). Formula SAE: Diseño de un chasis.

4.3.2 Chasis monocasco

El chasis y la carrocería están integrados en una sola unidad estructural. Este diseño, común en automóviles de pasajeros, SUVs y vehículos deportivos, permite una distribución eficiente de las cargas mecánicas, lo que optimiza la rigidez torsional y disminuye el peso global del vehículo. Generalmente fabricado en acero prensado, y en algunos casos utilizando aleaciones ligeras o materiales avanzados como la fibra de carbono.

Figura 8. Chasis Monocasco.



Fuente: Plaza, D. (2019b, enero 14). Así se hace un monocasco de Fórmula 1.

4.3.3 Chasis híbrido

El chasis híbrido es una estructura automotriz que fusiona las ventajas del chasis monocasco y del chasis de bastidor independiente, logrando un equilibrio óptimo entre rigidez, peso y resistencia. Esta configuración utiliza un bastidor central en áreas críticas, como el compartimiento del motor y la zona de carga, mientras que otras secciones del vehículo adoptan un diseño monocasco, lo que mejora la eficiencia en términos de peso y rendimiento. Su elevada rigidez torsional proporciona un manejo más estable y seguro, especialmente en situaciones de carga o terrenos difíciles. Además, el uso de materiales avanzados, como aleaciones ligeras, ayuda a disminuir el peso total del vehículo sin comprometer su resistencia estructural.

Figura 9. Chasis Híbrido.



Figura 3. Chasis. (s. f.). Diseño Automotriz UFT.

4.4 Características de un chasis para competencia Formula SAE

Estos vehículos deben contar con características claves que son necesarias para el mejor funcionamiento de un chasis, una de estas es que debe contar con materiales como por ejemplo la estructura debe ser elaborada mayormente de un acero de aleación baja en

carbono. Existen varias opciones factibles de aceros que pueden ser utilizados los cuales son el acero grado SAE 4130, acero grado SAE 1010 y el acero grado SAW 1020. (Baker, 2015)

El material más comúnmente utilizado es el acero SAE 4130 ya que cuenta con con un alto nivel de resistencia mecánica.

4.5 Materiales.

4.5.1 Acero SAE 4130

Este acero cuenta con un alto nivel de resistencia, el nombre más utilizado es acero cromo – molibdeno ya que estos elementos son los que lo conforman en mayor medida. La composición química del material se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 2. *Composición Química Acero grado SAE 4130*

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (%)
Carbón	0,28 - 0,33
Cromo	0,8 – 1,1
Molibdeno	0,15 - 0,25
Magnesio	0,4 - 0,6
Fósforo	0,035
Azufre	0,04
Silicio	0,15 – 0,3

4.5.2 Acero SAE 1010

Este es un material que es considerado como blando y poco resistente y que cuenta con una buena maleabilidad y ductilidad, este acero cuenta con un porcentaje de diferentes materiales que se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 3. *Composición Química Acero grado SAE 1010.*

ELEMENTO	PORCENTAJE (%)
Carbón	0,08 - 0,013
Magnesio	0,3 - 0,6
Fósforo	0,04
Azufre	0,05

4.5.3 Acero SAE 1020

Este material cuenta con un alto nivel de carbono en su composición en comparación de los otros aceros, es utilizado en mayor parte para estructuras con una resistencia mediana. La composición química del material se encuentra en la siguiente tabla. (Torres, 2013)

Tabla 4. *Composición Química Acero grado SAE 1020.*

ELEMENTO	PORCENTAJE (%)
Carbón	0,18 - 0,23
Magnesio	0,3- 0,6
Fósforo	0,04
Azufre	0,05
Silicio	0,15 – 0,3

4.6 Componentes que se acoplan al chasis

El chasis debe contar con componentes que sean adecuados para su mejor funcionamiento los cuales son:

Suspensión

El vehículo debe contar con un sistema de suspensión con amortiguadores, delanteros y traseros con un recorrido útil de las ruedas de al menos 50,8 mm o 2 pulgadas, 25,4 mm o una pulgada de rebote, con el conductor sentado.

Distancia del Suelo

Debe ser suficiente para evitar que cualquier parte del automóvil, excepto los neumáticos, toque el suelo durante las pruebas en pista.

Ruedas

Las ruedas deben tener 203,2 mm o 8 pulgadas de más de diámetro.

Llantas

Los vehículos pueden contar con dos tipos de llantas:

- Llantas secas: Estos neumáticos pueden ser de cualquier tamaño o tipo, pueden ser resbaladizos o pisados.
- Llantas para lluvia: Los neumáticos para lluvia pueden ser de cualquier tamaño o tipo de neumático con banda de rodadura o ranurado, siempre que haya una profundidad mínima de la banda de rodadura de 2,4 mm (3/32 de pulgada).

Volante

El volante debe estar conectado mecánicamente a las ruedas, este debe fijarse a la columna con una desconexión rápida.

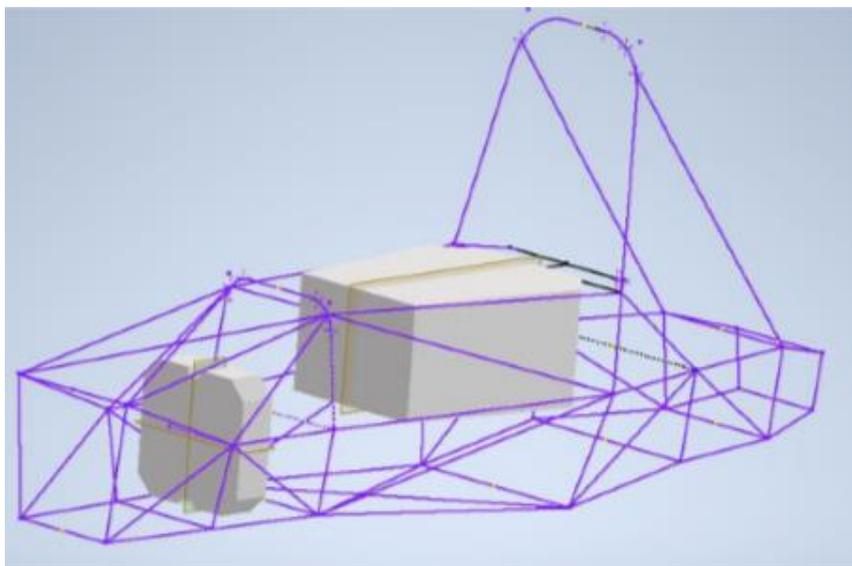
El sistema de dirección debe contar con topes de dirección positivos que impidan los varillajes de dirección se bloqueen, el juego libre permitido del sistema de dirección está limitado a siete grados.

La cremallera de dirección debe estar fijada mecánicamente al bastidor, así las uniones entre todos los componentes que unen al volante con la cremallera de dirección deben ser mecánicas y visibles en la inspección técnica.

4.7 Diseño.

El diseño de componentes y sistemas mecánicos en la ingeniería automotriz juega un papel importante para desarrollar soluciones que permitan satisfacer las necesidades específicas, mediante la consideración de características dimensionales, funcionales y estéticas (Cruz et al.,2021). El diseño empieza con la necesidad de mejora en distintos ámbitos de un componente o sistema, desde características estéticas hasta mecánicas de y de una idea base, puliéndose mediante una serie de procesos, uno de estos procesos modelado 2D, es un conjunto de dimensiones de dibujos que contienen geometrías en dos y tres dimensiones, son objetos modelados que me permiten utilizar las consideraciones dimensionales, funcionales y estéticas consiguiendo la visualización del objeto a ser diseñado. Según Soba Toquero el diseño asistido por ordenador, CAD, es una de las tecnologías que se basan en el uso de sistemas informáticos como herramienta de soporte en los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de piezas o sistema mecánicos.

Figura 10. Diseño de chasis.

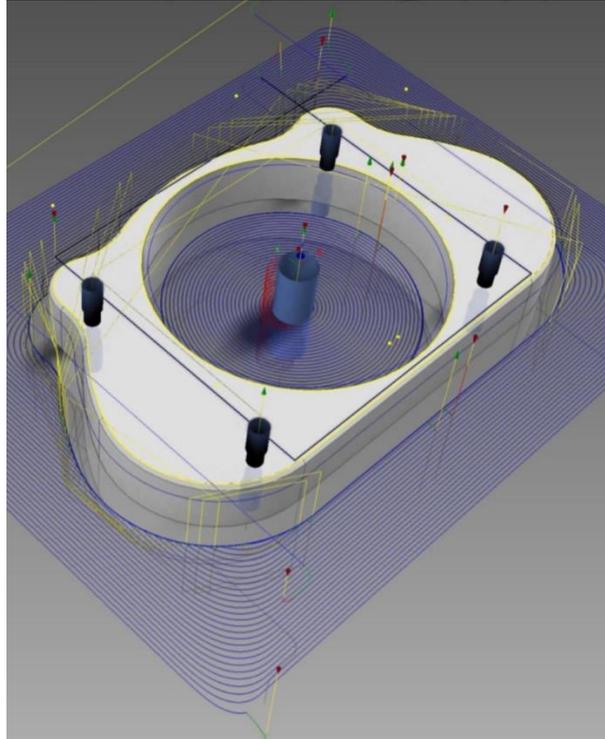


Fuente: Cagigas, 2023

Luego del proceso CAD se procede a comprobar el componente o sistema mediante un software CAE, aplicando las cargas, fuerzas y condiciones que experimentan el componente o sistemas. Dentro de la industria automotriz, la aplicación del proceso CAE es utilizado para la reducción de costos en la fabricación, mejoras estructurales mediante la reducción de peso sin comprometer la seguridad, apartados aerodinámicos y performance dentro de los vehículos (Espinoza y Román, 2021). En el diseño de un chasis, la aplicación CAE es una metodología necesaria para evaluar el comportamiento de la estructura debido a las distintas cargas que soportar tales como fuerzas de impacto, transferencia de masas, fuerza de frenado entre otras (Cagigas, 2023) y realizar una optimización basándose en los requerimientos necesarios para mejorar el estado actual del mismo.

Finalmente, el proceso final del diseño es la manufactura de componente o sistema posterior a la evaluación de la óptima funcionalidad mecánica, costo de producción y proceso de manufactura. En este apartado se utiliza software de manufactura asista por computadora (CAM), en donde se emplea computadoras con tecnología de computacional capaz de fabricar productos.

Figura 11. CAM para componentes automotrices.



Fuente: kibbetech.

4.8 Rediseño.

El rediseño en ingeniería es un procedimiento que me permite modificar o mejorar un diseño existente para optimizar su rendimiento, eficiencia, costo, o adaptarlo a nuevas necesidad o normativa. Con la diferencia del diseño inicial que empieza desde cero, el rediseño tomo como punto de inicio el diseño ya existente realizando ajustes y mejoras sobre él. Según Castillo y Gómez (2020). El rediseño es el proceso de transformación de un sistema existente para optimizar su funcionalidad, reducción de peso o adaptarlo a nuevas normativas. El rediseño de sistemas estructurales implica el uso de herramientas avanzadas como la simulación mediante métodos computacionales. Según Pérez y Rodríguez (2021), la integración del análisis por elementos finitos ha permitido la evaluación más precisa sobre el comportamiento de los sistemas rediseñados bajo distintas condiciones de cargas.

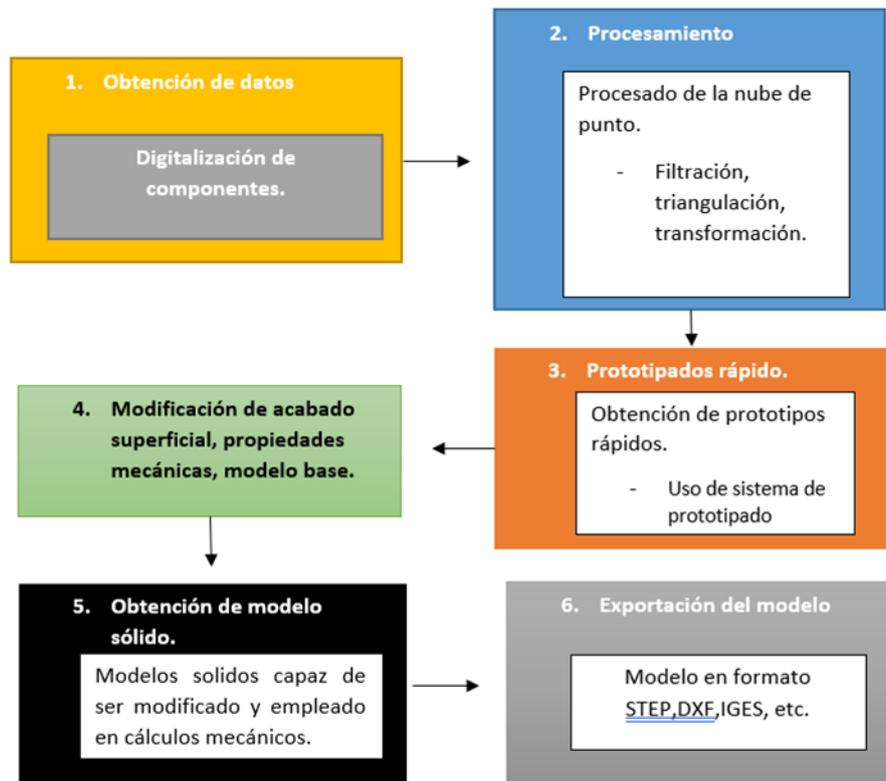
4.9 Métodos para dimensionamiento de un chasis.

4.9.1 Ingeniería inversa.

La ingeniería inversa permite replicar modelos a partir de la manipulación de datos tridimensional en un entorno digital (Monroy et al.,2021). Este proceso implica la captura y medición de un objeto físico con el fin de obtener su geometría precisa y, después, crear una réplica que contenga sus características geométricas y funcionales. Dentro de la ingeniería inversa es posible la aplicación medición manual utilizando herramientas de medición como calibradores, galgas y micrómetros, siempre y cuando la geometría no exija un nivel complejo, caso contrario con una geometría compleja se necesita el manejo de técnicas avanzadas como el escaneo 3D o la fotogrametría, que permitan un levantamiento preciso de la forma y características del objeto.

La aplicación de ingeniería inversa en el diseño y duplicación de partes para componentes mecánicos es ideal para recabar información de un modelo físico sin necesitar documentación digital o grafica (Carro et al.,2019). La metodología de ingeniería inversa es apreciada cuando se requiere trabajar con precisión y aplicadas a geometrías complejas, obteniendo reducción de tiempo y error implicado que conlleva el proceso de diseño tradicional. Además, facilita la optimización de diseños existentes, utilizando software de diseño mecánico para lograr alcanzar resultados óptimos (Bravo, 2021). A continuación, se presentará el flujograma que se aplica para un proceso de ingeniería inversa.

Figura 12. Flujograma de Ingeniería inversa con escaneo 3d.

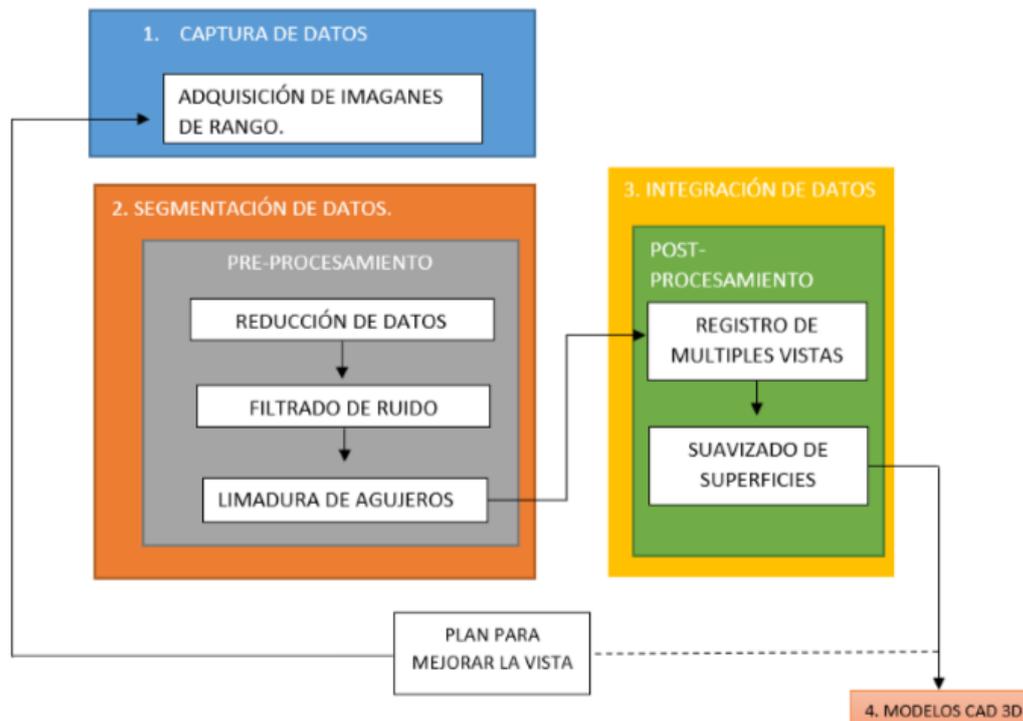


Fuente: Autores.

4.9.2 Escaneo laser 3D.

Proceso de captura la forma y aspecto del objetivo a replicar mediante el uso de escáner 3D, convirtiendo el aspecto físico en un archivo tridimensional capaz de ser modificado por acción de un software CAD. Dicho escáner emplea tecnologías tales como laser, fotogrametría y luz estructurada. Según Betancur, el escaneo de un objeto a estudiar mediante el barrido laser cuenta con una precisión variable de acuerdo a resolución del equipo, además la velocidad de escaneo tiende a ser media y por lo general suele aplicarse a piezas pequeñas y medianas con formas libres.

Figura 13. *Flujograma de escaneo 3D.*



Fuente: Autores.

Captura de datos.

Adquisición de imágenes de rango.

- **Preparación del objeto.**

Previa a la captura de datos, se deben realizar pasos previos, tales como:

- Preparación de escáner 3d, en caso de contar con lentes, se debe propiciar el cambio de lente para un escaneo optimo del objeto.
- Encender en primera instancia el digitalizador antes del computador que contiene el programa.
- Luego del segundo paso, se abre el programa utiliza por el escáner 3D y se vincula el modelo de escáner a usar.

Segmentación de datos.

- **Reducción de datos**

La reducción de datos es la simplificación de un modelo 3D mediante la exclusión de detalles sobrantes que no afecten a la información esencial, para ello se emplea los siguientes pasos:

- Adquisición de modelos escaneado.
- Simplificación de malla, reduciendo polígonos, pero manteniendo la forma general.
- Reducción de texturas.
- **Filtrado de ruido.**

El filtrado de ruido es el proceso de eliminación de puntos erróneos que afecten al modelo final, para ello se emplea:

- Importar el modelo escaneado.
- Visualización del escaneo con el objetivo de visualizar áreas con ruido visible.
- Aplicar un filtro como filtro suavizado, de proximidad o estadístico.
- Verificación de la eliminación de ruido.
- **Limadura de agujeros.**

Proceso de rellenar o tapar agujero producto del escaneo al objeto, por lo general se encuentran en bordes de la superficie digitalizada, para eliminar dichos agujeros se emplea:

- Importar y detectar agujero sobre la superficie del modelo.
- Escoger herramientas de reparación como comandos llamados BUILD/FILL HOLES/AUTO.
- Adaptar las geometrías si es necesario.

Integración de datos.

- **Registro de múltiples vistas.**

Consiste en alinear y combinar escaneos de diferentes ángulos para crear el modelo tridimensional para ello empleamos algunos pasos como:

- Adquisición de diferentes posiciones del objeto.
- Importar los escaneos en un software de modelado 3d que soporte registro.
- Alineación de vista y fusión de modelos.
- Verificación de inconsistencias.
- **Suavizado de superficies.**
 - Archivo del modelo 3d con registro de múltiples vistas.
 - Identificación de áreas a suavizar.
 - Escoger herramienta de suavizado en el programa.
 - Ajuste de parámetros referente al suavizado.
 - Verificación y almacenamiento del modelo final.

Para finalizar, dentro del flujograma vemos una iteración entre el modelo CAD 3D y un nuevo inicio del proceso con el objetivo de generar un modelo con una mejor resolución evitando errores que puedan afectar al estudio sobre el modelo.

Figura 14. Escaneo 3d de componente automotriz.



Fuente: (“Go!Scan 3D by Geomagic | 3D Scanning services at EMS USA,” 2018)

4.9.3 Medición manual.

La medición manual es un método efectivo y fundamental en el ámbito de la ingeniería y el diseño, especialmente cuando se trata de geometrías simples o cuando los recursos tecnológicos mencionados anteriormente no se encuentran a disposición (Díaz et al.,2024). Las herramientas tradicionales como calibrador, micrómetros y cinta de medición son las más utilizadas para realizar mediciones lineales, diámetros y espesores en geometrías tubulares contando con una precisión considerable, pero inferior al tratarse de los métodos como el escaneo laser del objeto a medir. Según Díaz, La calibración y control de equipos de medición cumple un papel importante en la metrología. A pesar de sus limitaciones en el ámbito de precisión y velocidad, estas herramientas manuales se mantienen como favoritas por los temas de accesibilidad y facilidad de uso en el campo de medición y diseño.

Figura 15. *Flujograma de metrología.*



Fuente:Autores.

4.10 Consideraciones de diseño.

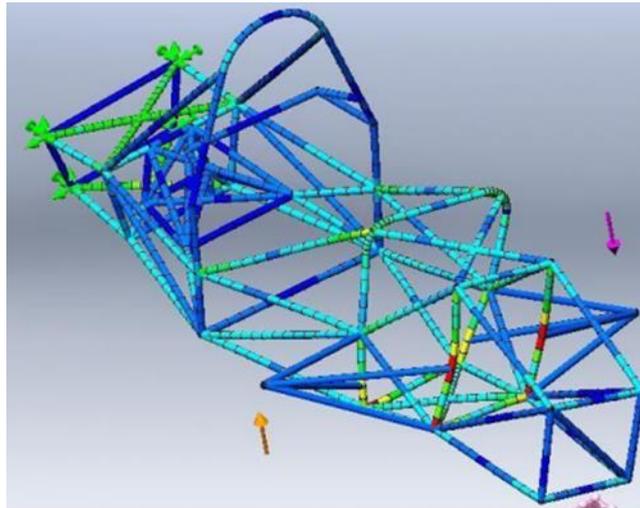
El diseño de chasis perteneciente a la formula SAE, se considerará el reglamento de formula SAE para la construcción, en donde el vehículo se distribuye en tres áreas las cuales son el área de motor, el área de habitáculo del conductor y el área de pontones laterales. Establecidas en el reglamento, para una modificación sobre la estructura se debe considerar el reglamento actual sin afectar factores como seguridad, ergonomía, exigencias aerodinámicas y dimensiones totales del vehículo.

4.11 Análisis numérico.

El análisis numérico es una herramienta fundamental para desarrollar soluciones para problemáticas complejas que no pueden abordarse con métodos analíticos convencionales. En piezas o sistemas mecánicos, el análisis numérico permite la simulación, modelaje y la predicción del comportamiento de la pieza o sistema bajo la aplicación de diferentes condiciones de carga, esfuerzo y deformación. De acuerdo con Serrano y López (2019), los métodos numéricos como el método de los elementos finitos son fundamentales en el análisis de estructuras y mecanismos complejos, permitiendo la descomposición del sistema en elementos de menor tamaño que puedan ser estudiados individualmente para alcanzar una solución integral.

Uno de los primordiales beneficios del análisis mencionado es la capacidad para optimizar el diseño de sistema o piezas mecánicas, prediciendo cual será el comportamiento bajo las condiciones aplicadas sin la necesidad de construir y realizar pruebas destructivas. Según García y Torres (2020), el análisis numérico es una técnica ampliamente usada en la industria automotriz y aeroespacial, industrias en donde es necesario analizar componentes sometidos a esfuerzo de gran magnitud tales como el chasis del vehículo, sistema de suspensión, permitiendo identificar los puntos de fallo y proponiendo un perfeccionamiento en el diseño.

Figura 16. *Mallada de estructura.*

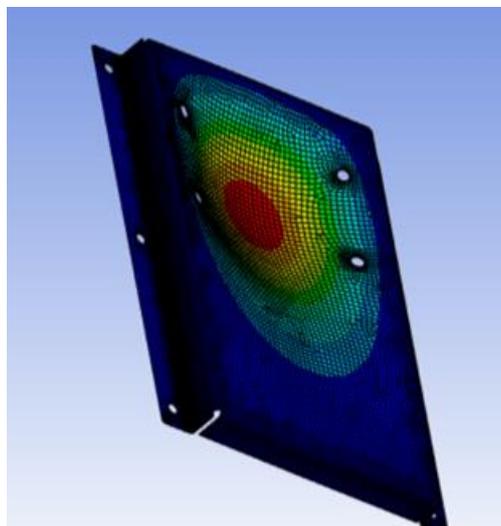


Fuente: Córdova y Merchán, 2020.

4.11.1 Tipo Shell

Este método se fundamenta en el uso de elementos bidimensionales, aplicados al análisis de paneles o componentes estructurales de pared delgada en relación con sus dimensiones globales. Para implementarlo, se utilizan programas de CAE, ya que se trabaja a partir de superficies medias obtenidas de las distintas partes del modelo CAD (Acosta,2022).

Figura 17. *Método tipo Shell.*

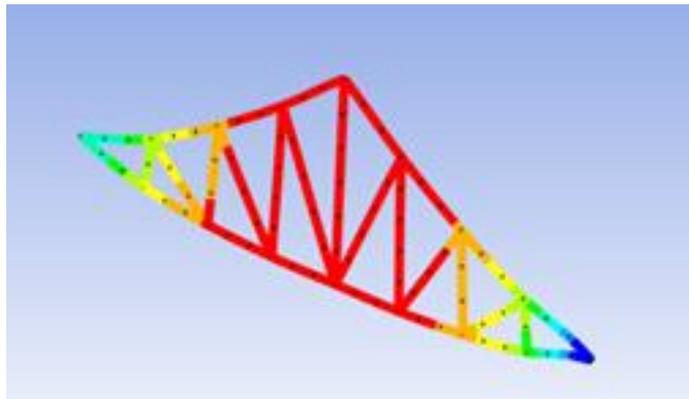


Fuente: Autores.

4.11.2 Tipo Beam

Este método utiliza elementos estructurales tipo viga, los cuales experimentan deformaciones en dirección perpendicular a su eje principal. Los esfuerzos se calculan tomando en cuenta las dimensiones de la barra, como el área, la longitud, el momento de inercia y las propiedades del material. Es un método usado para ahorrar recursos computacionales, por lo general cuando se procede a realizar mallado sobre la estructura se obtiene mallado cercana a 1 (Cuenca y Jara, 2022).

Figura 18. Método tipo Beam.



Fuente: Autores.

4.12 Cargas aplicadas

El chasis está sujeto a varios tipos de cargas, tanto en estado de movimiento como en reposo, y es fundamental identificarlas durante su diseño. Estas cargas generan distintas deformaciones en el chasis, cuya magnitud y tipo varían según la intensidad de las fuerzas aplicadas. Entre las principales deformaciones se encuentran: torsión longitudinal, horizontal lozengeing, flexión lateral y vertical.

4.12.1 Torsión Longitudinal

Esta deformación es el resultado de cuando las fuerzas actúan de una manera opuesta, estas son aplicadas a una o dos ruedas del vehículo. El chasis es el encargado de conectar los extremos donde actúan mayormente las cargas de la suspensión. (Riley & George, 2002)

4.12.2 Horizontal Lozenging

Esta deformación surge de fuerzas longitudinales opuestas que actúan sobre ruedas ubicadas en ejes distintos del chasis. Estas cargas se generan por las variaciones de altura en el pavimento y cambian en magnitud según el modo de conducción del vehículo. (Singh, 2010)

4.12.3 Flexión Lateral.

Esta deformación se origina por fuerzas centrífugas y la acción de impactos laterales del viento en una magnitud específica. Estas cargas se distribuyen a lo largo de la estructura y son soportadas por componentes del bastidor, como el arco antivuelco y la estructura del impacto lateral. (Singh, 2010)

4.12.4 Flexión Vertical.

Esta deformación resulta del peso acumulado de todos los componentes del vehículo que descansan sobre el bastidor, generando esfuerzos de flexión en casi todos los elementos estructurales. Estas reacciones ocurren en los ejes, localizándose la deformación en torno al centro de gravedad. (Riley & George, 2002)

4.12.5 Estimación de cargas.

Todos los elementos del del vehículo Formula SAE deben soportar 3,5 gramos de impacto, 1,5 gramos de fuerzas laterales y 1,5 gramos de frenado, para el análisis de elementos finitos estas cargas se deben considerar individualmente y combinadas.

Existen diferentes masas que hay que tener en cuenta en el vehículo. (Singh, 2010)

Tabla 5. Masas aproximadas del vehículo.

Elemento	Masa (kg)
Conductor	80
Motor	12
Chasis	35
Batería	80

Sistema de Dirección	10
Tren de Fuerza	20

Existen requisitos necesarios para que pueda realizar el desarrollo del análisis estructural, las cuales son fuerzas o momentos que intervienen en las diferentes pruebas.

Tabla 6. *Requisitos de análisis estructurales.*

Prueba	Condiciones de Restricción	Aplicación de Fuerzas
Torsión longitudinal	Fijar los soportes de la suspensión posterior.	Par de fuerzas aplicado en el eje delantero sobre los soportes de la suspensión frontal.
Análisis de Frecuencia	Fijar los soportes de la suspensión delantera y posterior.	Aplicar en toda la estructura una frecuencia de rango entre 69,12 Hz a 204,70 Hz.
Flexión Estática Vertical	Fijar los soportes de la suspensión delantera y posterior.	Cargas distribuidas a lo largo de la cabina y la estructura del motor en sentido vertical.
Flexión Estática Lateral	Fijar los soportes de la suspensión delantera y posterior.	Cargas distribuidas a lo largo de la cabina y la estructura del motor en sentido horizontal.

5. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA MEDIANTE DIMENSIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL.

5.1 Ingeniería Inversa aplicada.

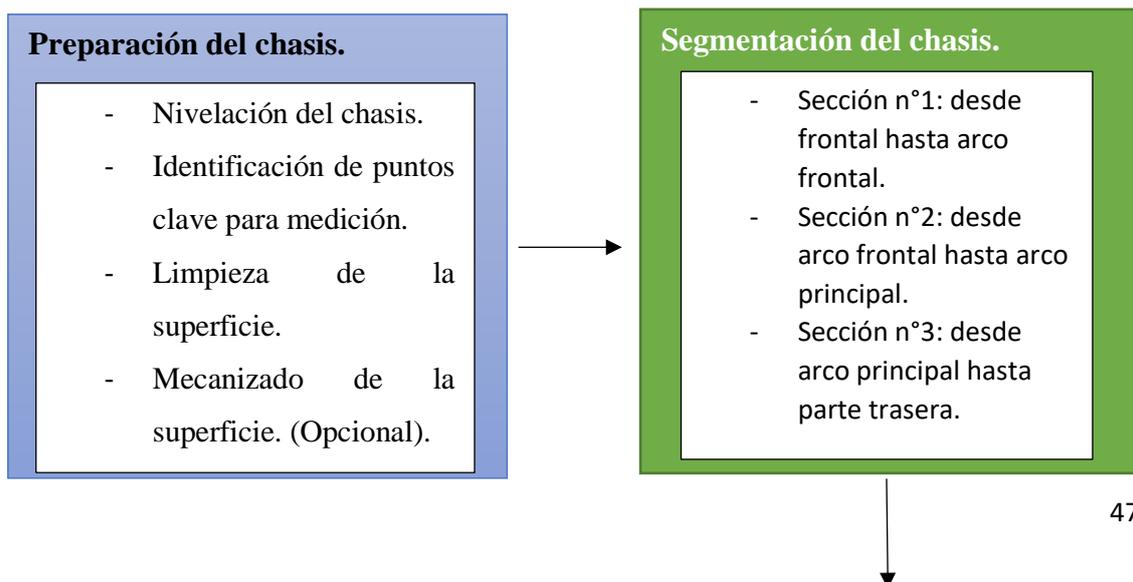
En este proyecto, la ingeniería inversa se aplica al dimensionamiento del chasis tubular y al análisis del material utilizado. Se emplea un método no destructivo que divide el chasis en tres secciones, preservando la integridad y permitiendo múltiples mediciones sin afectar la precisión de futuros análisis. Esta segmentación facilita el acceso a áreas específicas, optimizando la recolección y organización de datos, esenciales para documentar dimensiones, comparar segmentos, identificación de errores. Las mediciones son sometidas a un tratamiento estadístico, permitiendo resumir datos y genera estadística descriptiva para respaldan la toma de decisiones en el proyecto.

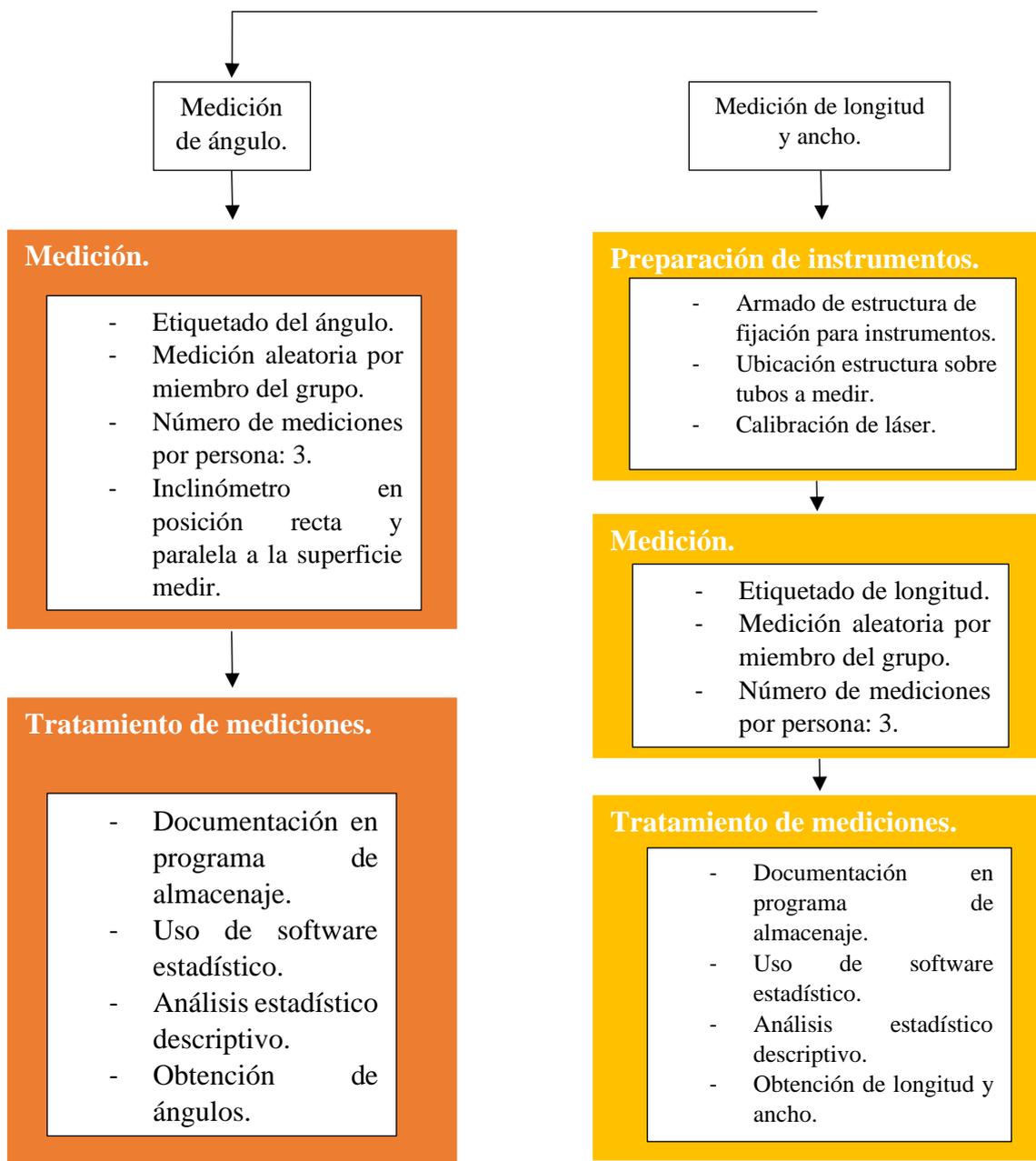
El material utilizado en la fabricación chasis en la tesis llamada “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHASIS TUBULAR DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELÉCTRICO”, en este documento se registra el uso del ACERO SAE 4130, el cual fue la mejor opción para utilizar debido que se realizó una comparativa con otros aceros utilizando una matriz para evaluarlos y seleccionar la mejor opción.

5.2 Introducción al proceso de medición.

La medición del chasis tubular se centra: la longitud, ancho e inclinación de los miembros estructurales. Se empleó una metodología que integra el uso de instrumentación de medición, como un inclinómetro o un medidor de distancia laser, con el propósito de garantizar la mayor exactitud y minimizar los errores en las mediciones.

Figura 19. Flujograma del proceso general de medición.

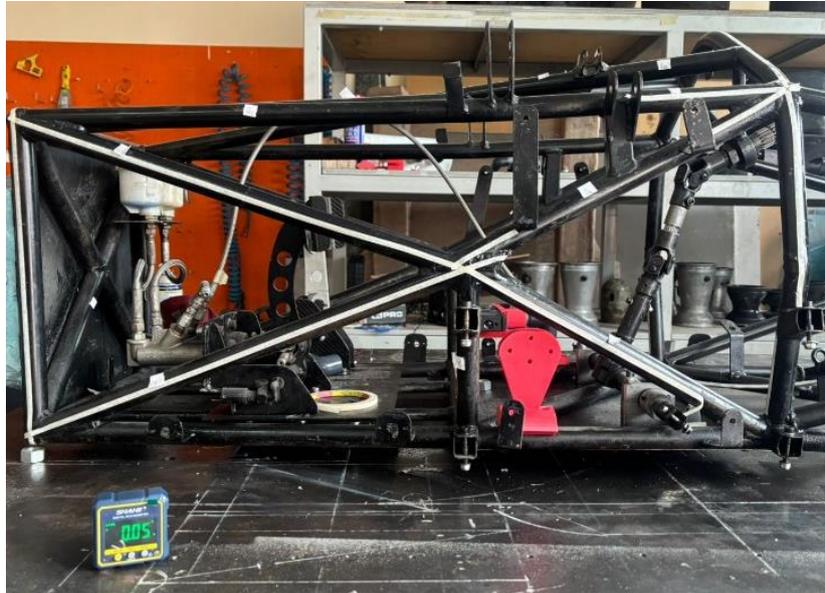




El primer parámetro para iniciar la medición del chasis es su adecuada preparación. Esto incluye la nivelación del chasis sobre la superficie, ya que un desnivel podría alterar la precisión de las mediciones. Una vez nivelado, se identifican de puntos clave servirán como referencia para el proceso de medición. Además, es fundamental limpiar la superficie del chasis para eliminar cualquier suciedad, ya sea de origen natural o derivada del proceso constructivo, que pueda interferir en los resultados. Para finalizar, se realiza un mecanizado en los puntos claves que sirven como referencia afectadas por

la escoria de soldadura para garantizar una óptima medición, siempre y cuando sea necesario.

Figura 20. Nivelación del chasis.



Fuente: Autores.

Figura 21. Limpieza del chasis.



Fuente: Autores.

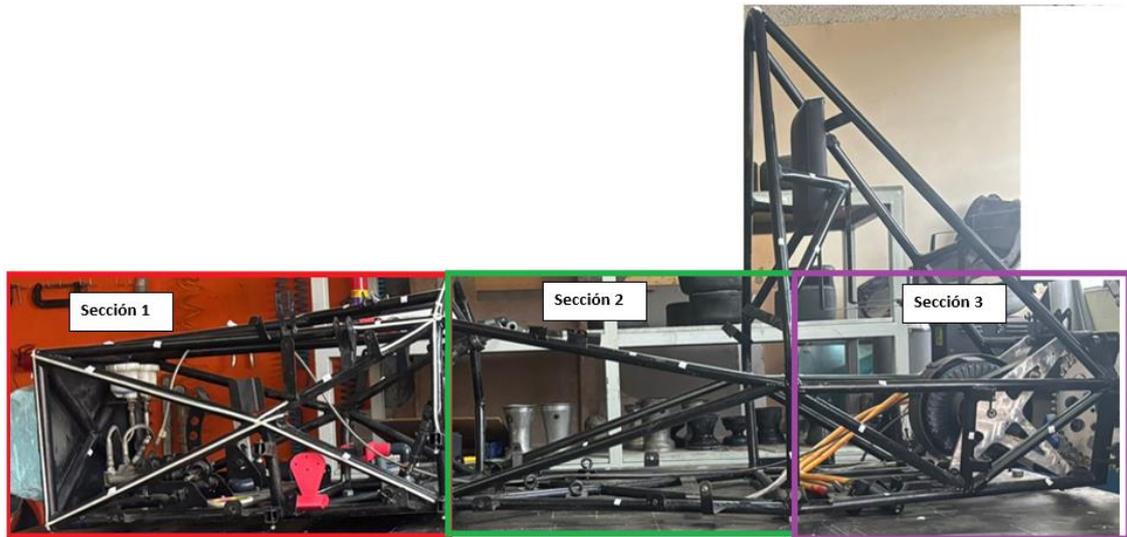
Figura 21. Mecanizado del chasis.



Fuente: Autores.

El segundo parámetro es el seccionamiento del chasis, que se divide en tres partes, permitiendo trabajar y analizar cada sección de forma independiente. La primera sección comprende la parte frontal del chasis hasta el arco frontal, la segunda sección abarca desde el arco frontal hasta arco principal y por último desde el arco principal hasta la parte trasera del chasis.

Figura 22. *Seccionamiento del chasis.*



Fuente: Autores.

Con los parámetros previamente aplicados al chasis, se procede a identificar las características a medir: ángulo, longitud o ancho. Si se decide medir los ángulos, el primer parámetro es registrar el ángulo específico para su correcto almacenaje. Posteriormente, se realizan tres mediciones en puntos seleccionados de forma aleatoria. Es fundamental asegurar el uso adecuado del instrumento de medición, ubicándolo recto y paralelo a la superficie a medir. Finalmente, los valores obtenidos se registran para su posterior análisis.

Si se elige medir la longitud o el ancho, el primer parámetro es la preparar el instrumento de medición mediante el ensamblaje de la estructura que permita fijarlos al chasis tubular. El instrumento debe ser colocado en puntos estratégicos del chasis que faciliten las mediciones, considerando la disposición en diferentes partes del chasis. La calibración del medidor de distancias laser se realiza asegurando su correcta ubicación dentro del soporte diseñado para este propósito, el cual incluye una señal de referencia que se explicara más adelante.

Para las mediciones de longitud y ancho, es necesario registrar previamente la característica específica a medir para su correcto almacenamiento. Se realizan tres mediciones por persona de forma aleatoria, en los puntos específicos. Finalmente, todos los datos deben registrarse y almacenarse para su posterior procesamiento en un software de análisis estadístico (Corral et al, 2021).

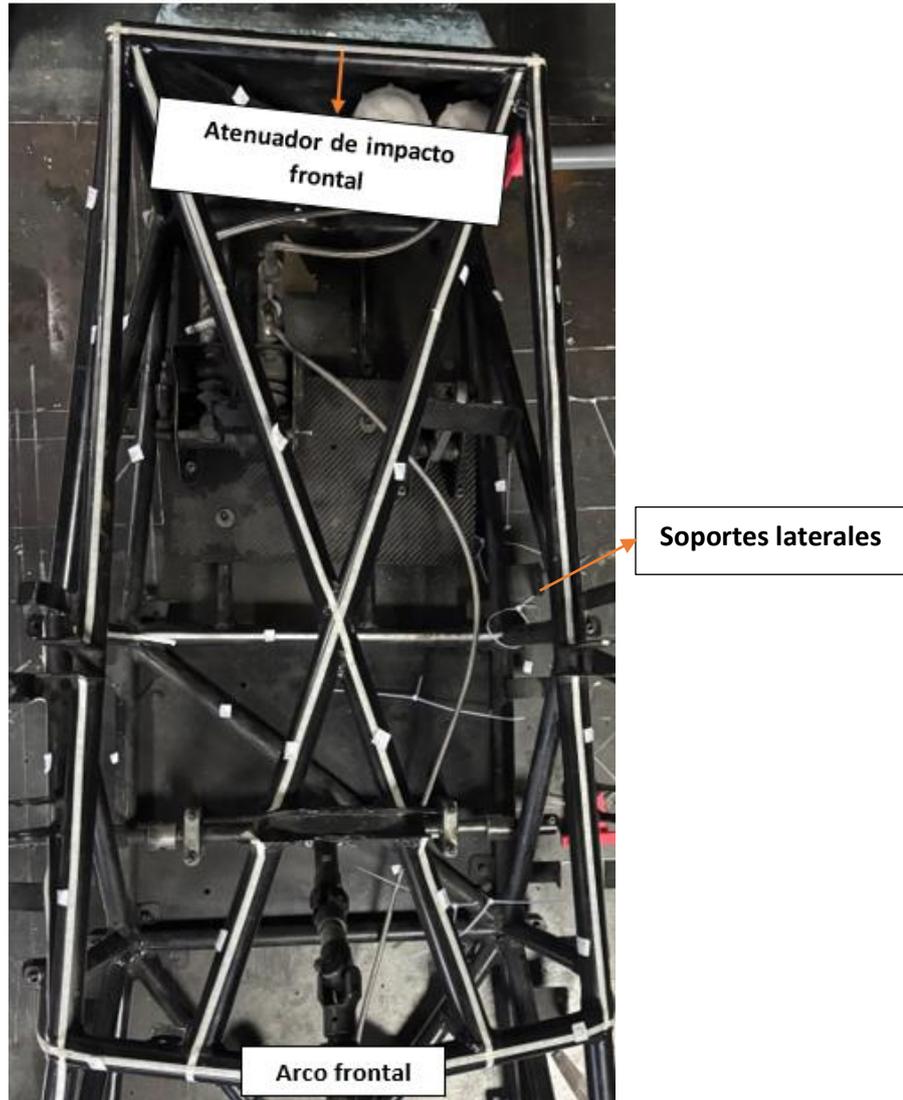
5.2.1 Secciones de medición.

Las secciones de medición son 3, las cuales se detalla a profundidad a continuación:

- **Sección 1.**

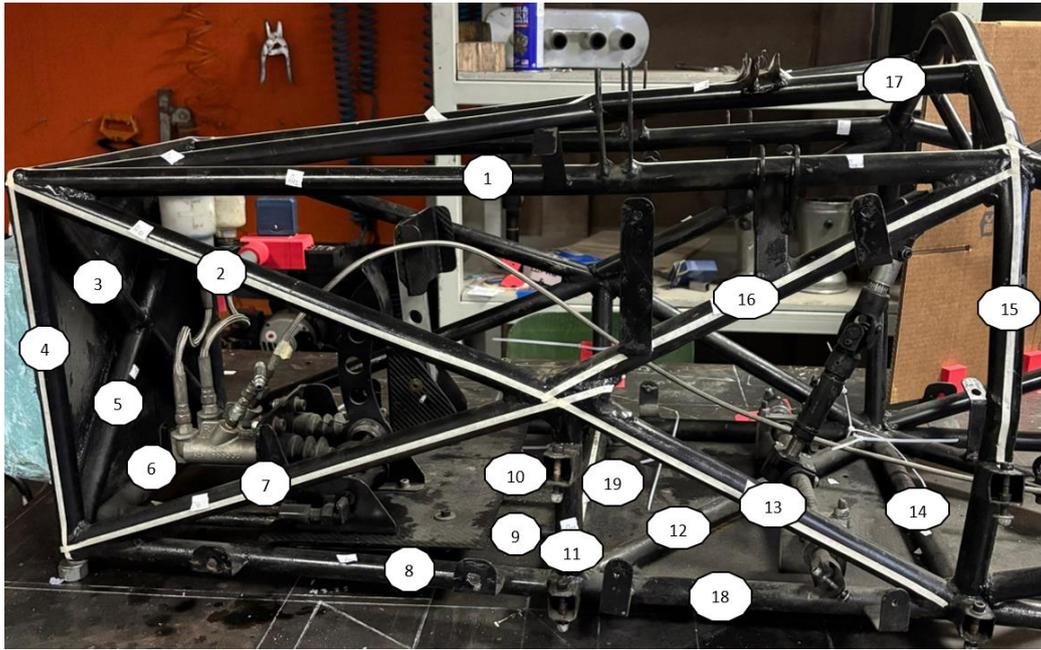
La sección 1 se delimita desde atenuador de impacto frontal hasta el arco frontal, está compuesta por un total de 29 elementos tubulares que conforman dicha sección. En ella, se incluyen componentes clave como la dirección y los pedales de freno y aceleración.

Figura 23. Delimitación de la sección 1.



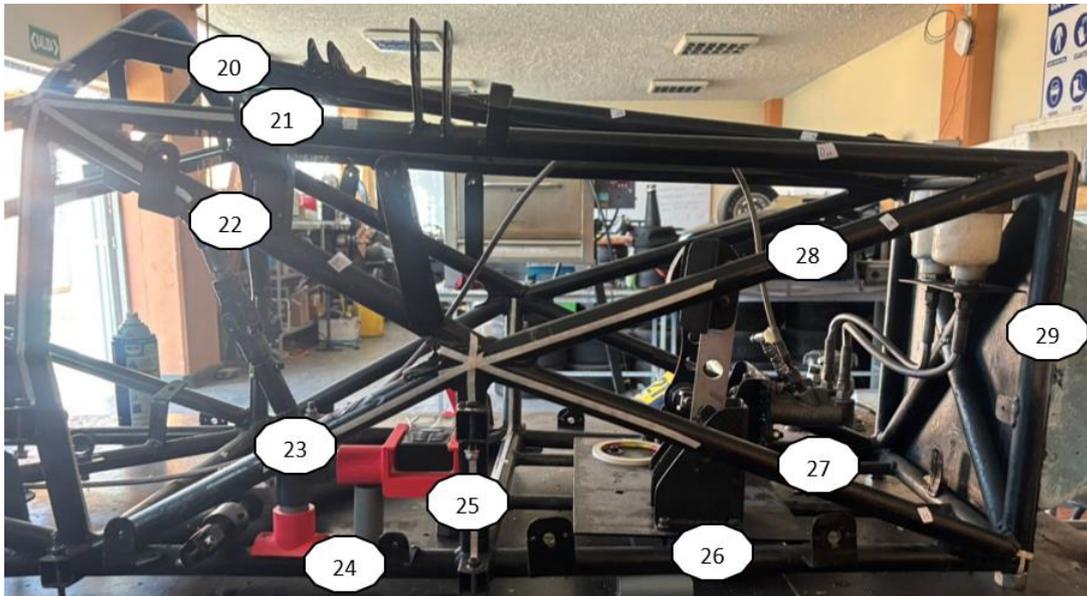
Fuente: Autores.

Figura 24. Registro de tubos vista perfil izquierdo.



Fuente: Autores.

Figura 25. Registro de tubos vista derecha.

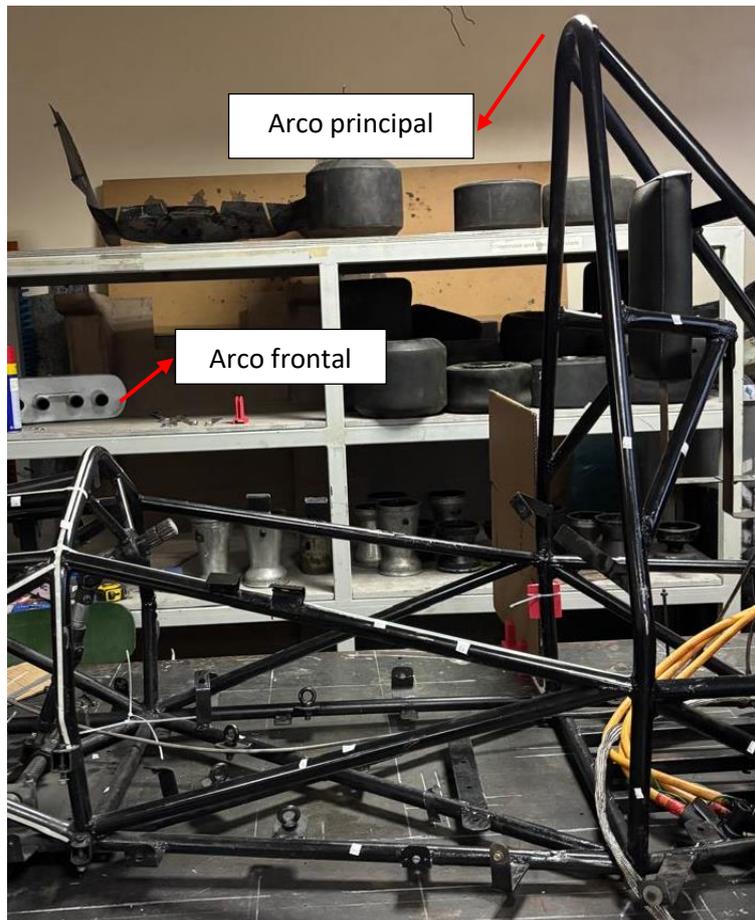


Fuente: Autores.

- **Sección 2.**

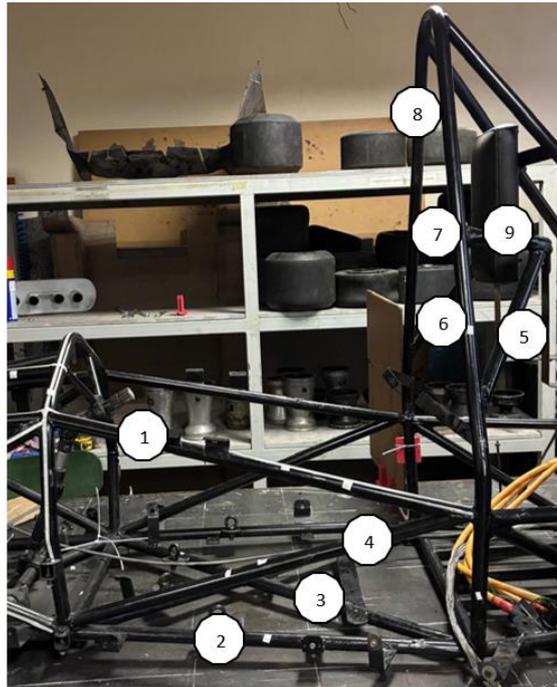
La sección 2 está delimitado desde el arco frontal hasta el arco principal del chasis y contiene un total de 13 componentes tubular. En esta sección se alberga el habitáculo del piloto, así como miembros estructurales claves, como las protecciones laterales.

Figura 26. Delimitación de la sección 2.



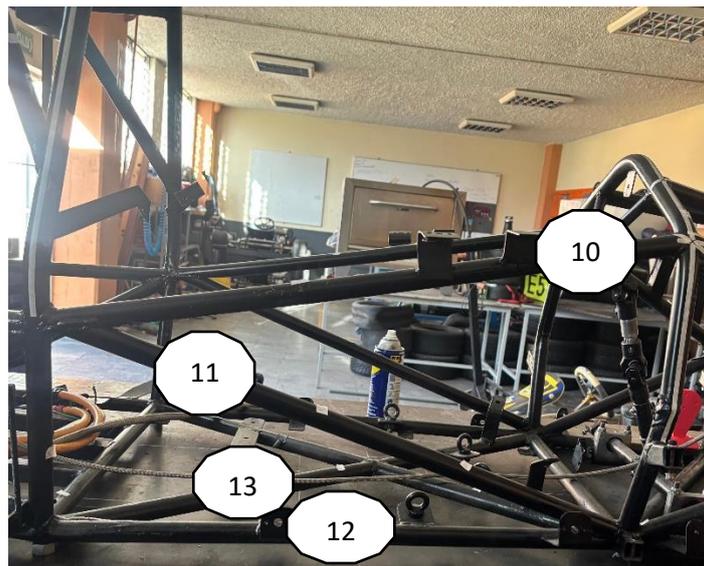
Fuente: autores.

Figura 27. Registro de tubos vista perfil derecho.



Fuente: autores.

Figura 28. Registro de tubos vista izquierda.

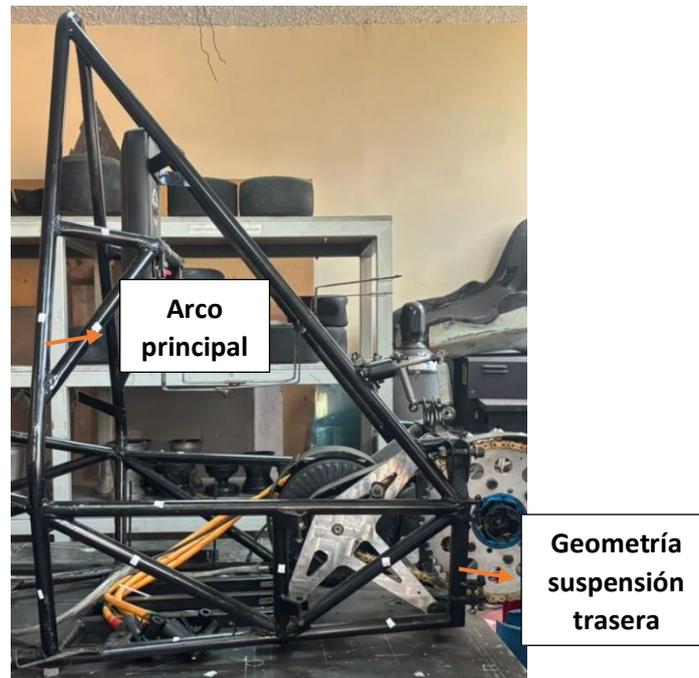


Fuente: autores.

- **Sección 3.**

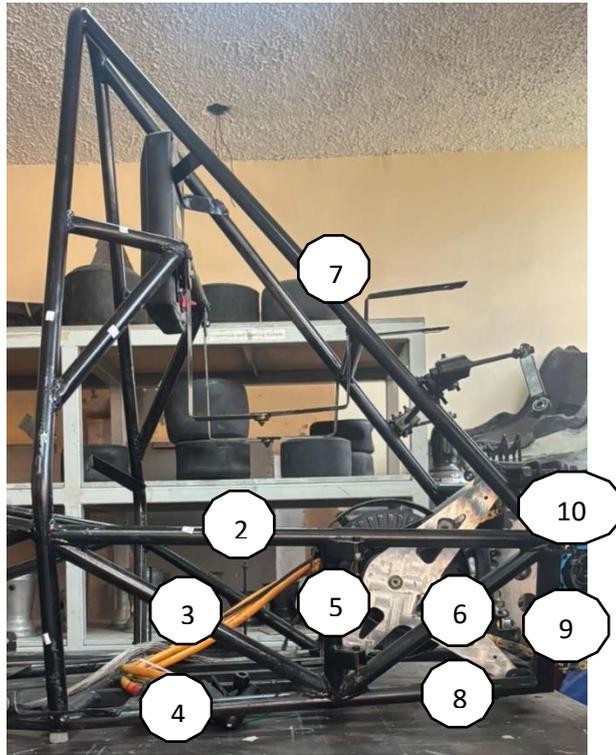
La sección 3, está delimitada desde el arco principal hasta la geometría de la suspensión trasera, y cuenta con 26 componentes tubulares. Esta sección alberga el tren de potencia eléctrico.

Figura 29. Delimitación de la sección 2.



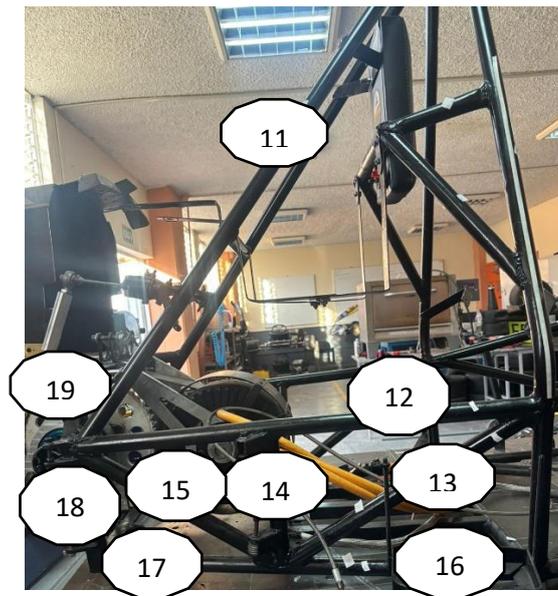
Fuente: autores.

Figura 30. Registro de tubos vista perfil derecho.



Fuente: autores.

Figura 31. Registro de tubos vista perfil derecho.

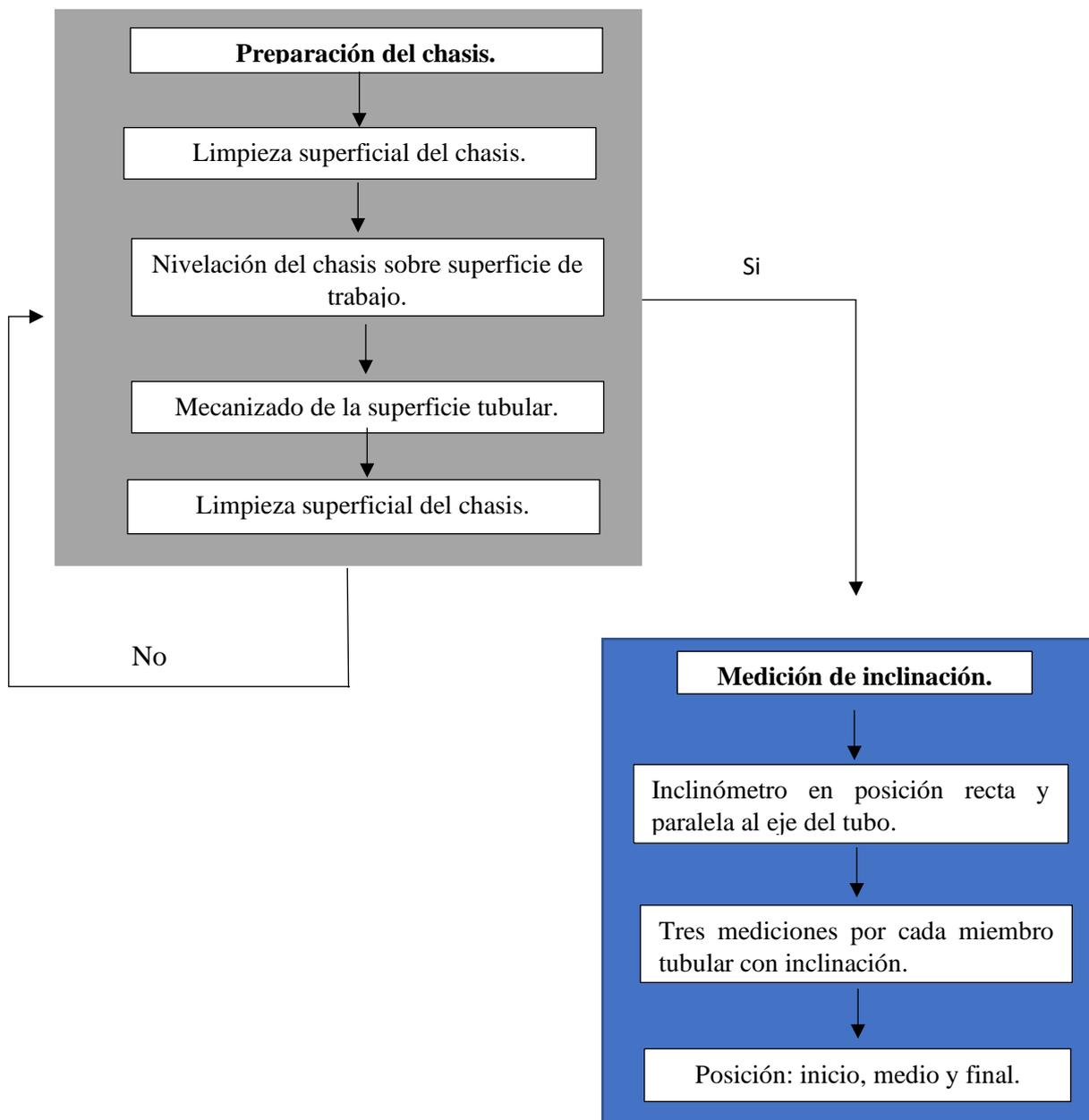


Fuente: autores.

5.2.2 Mediciones angulares.

Se comienza midiendo las inclinaciones de los componentes tubulares de cada sección. Además, la medición de la inclinación permite identificar posibles problemas estructurales. El proceso para medir la inclinación de los componentes tubulares se basa en seguir el procedimiento previamente mencionado, colocando el inclinómetro digital sobre la superficie de manera recta y paralela al eje de componente tubular.

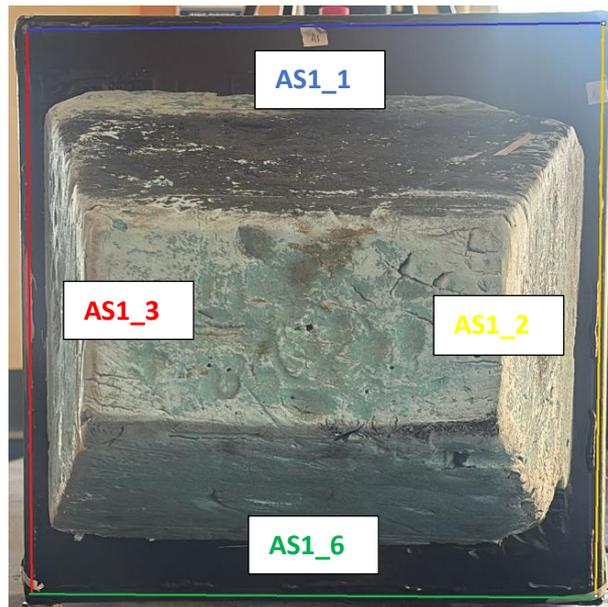
Figura 32. Flujoograma preparación y medición del chasis.



- **Sección 1.**

Para registrar las inclinaciones de los componentes tubulares se emplea la siguiente denominación: “AS1_1”, que representa a los ángulos de la sección 1 “AS1 y el número que se encuentra después de guion cambia según la inclinación con respecto al miembro tubular. A continuación, se evidencia el registro de los ángulos tomados:

Figura 33. Registro de ángulos vista frontal.



Fuente: autores.

Figura 34. Registro de ángulos vista derecha.



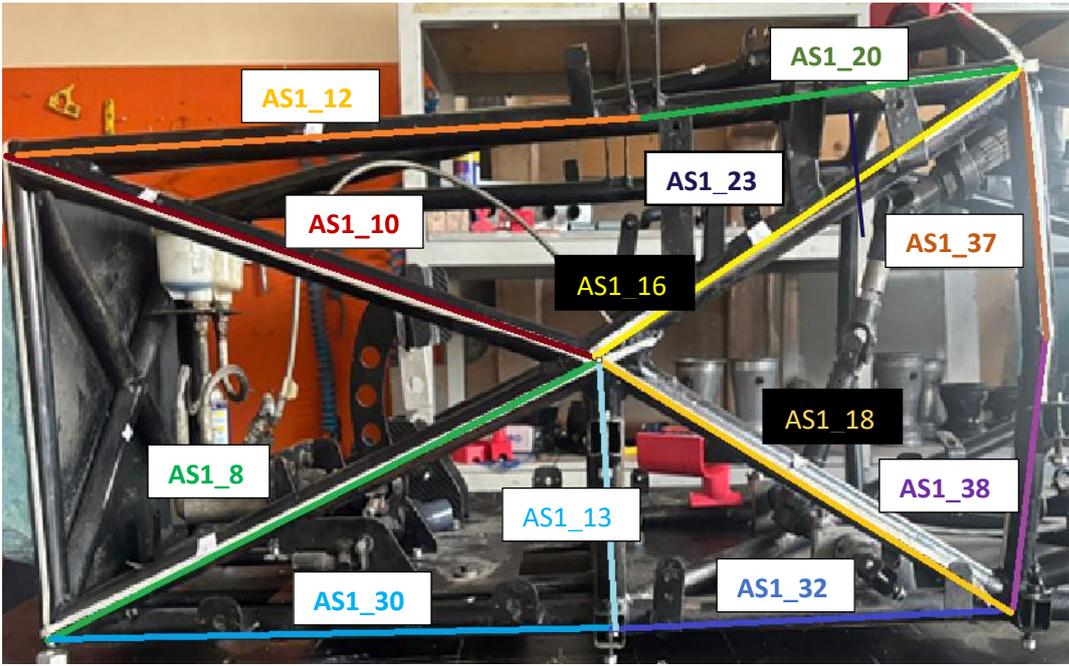
Fuente: autores.

Figura 35. Registro de ángulos vista izquierda.



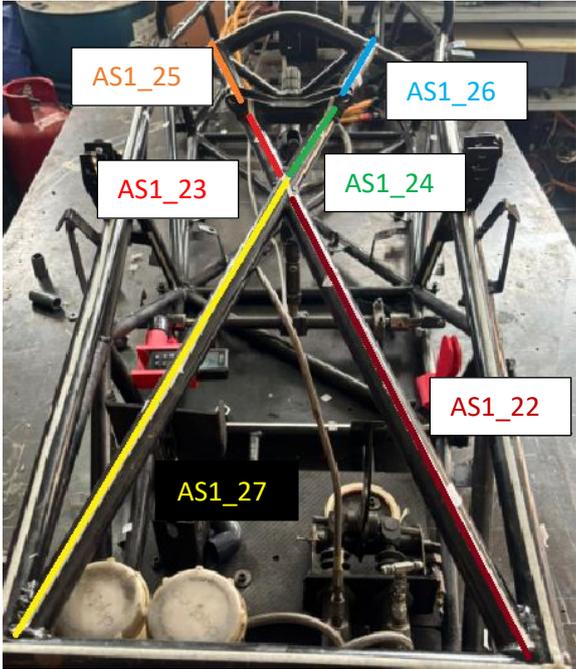
Fuente: autores.

Figura 36. Registro de ángulos vista derecha.



Fuente: autores.

Figura 37. Registro de ángulos vista superior.

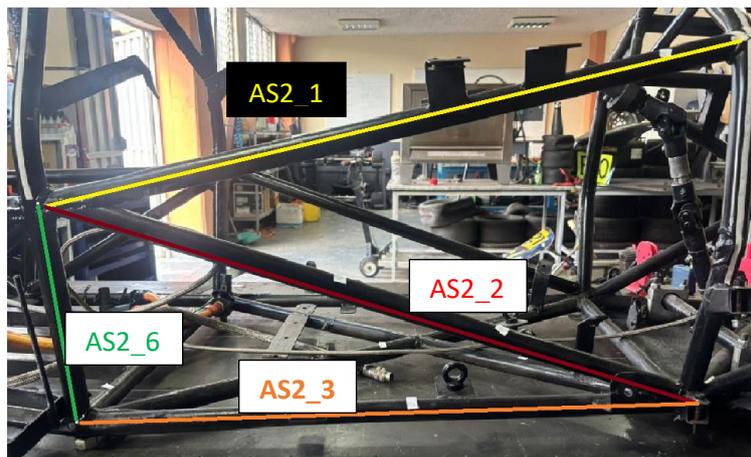


Fuente: autores.

Sección 2.

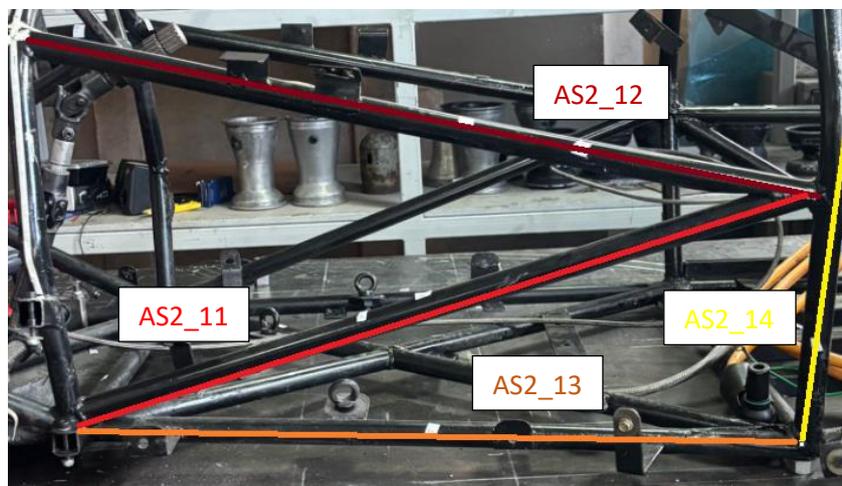
Para registrar las inclinaciones de los componentes tubulares se emplea la siguiente denominación: “AS2_1”, que representa a los ángulos de la sección 2 “AS2” y el número que se encuentra después de guion cambia según la inclinación con respecto al miembro tubular. A continuación, se evidencia el registro de los ángulos tomados:

Figura 38. Registro de ángulos vista izquierda.



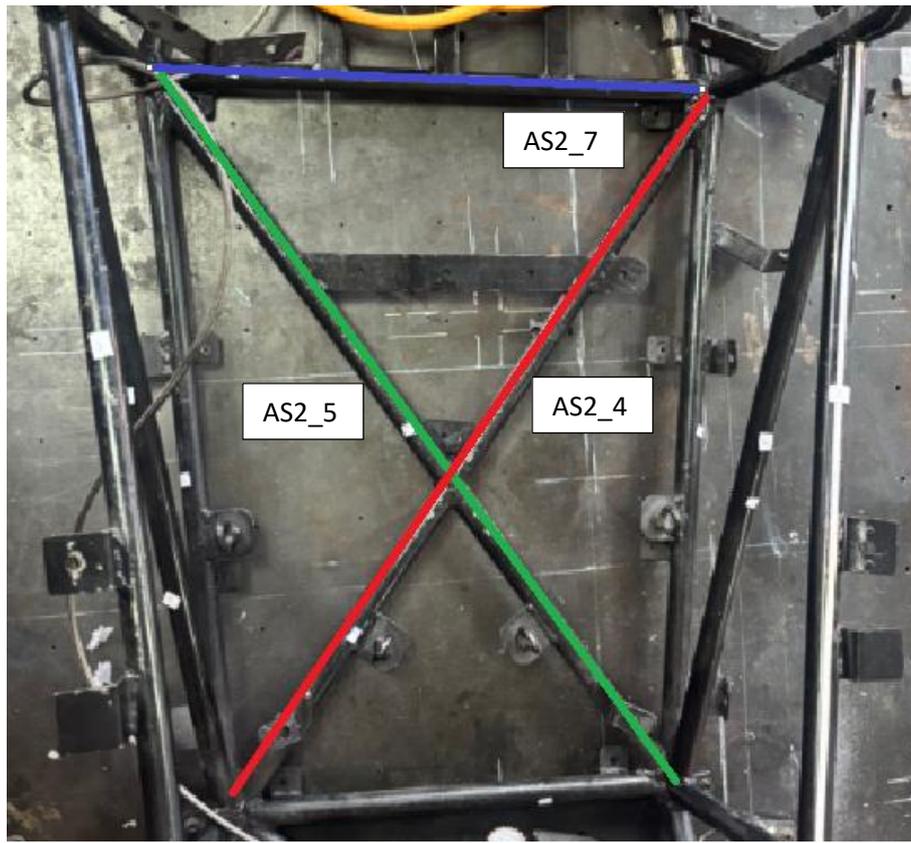
Fuente: autores.

Figura 39. Registro de ángulos vista derecha.



Fuente: autores.

Figura 40. Registro de ángulos vista superior.

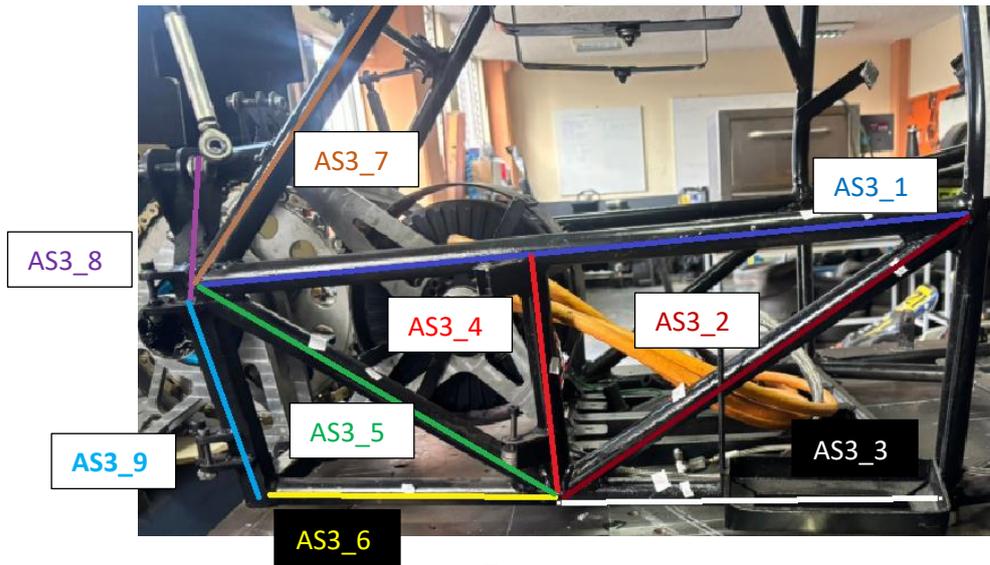


Fuente: autores.

- **Sección 3.**

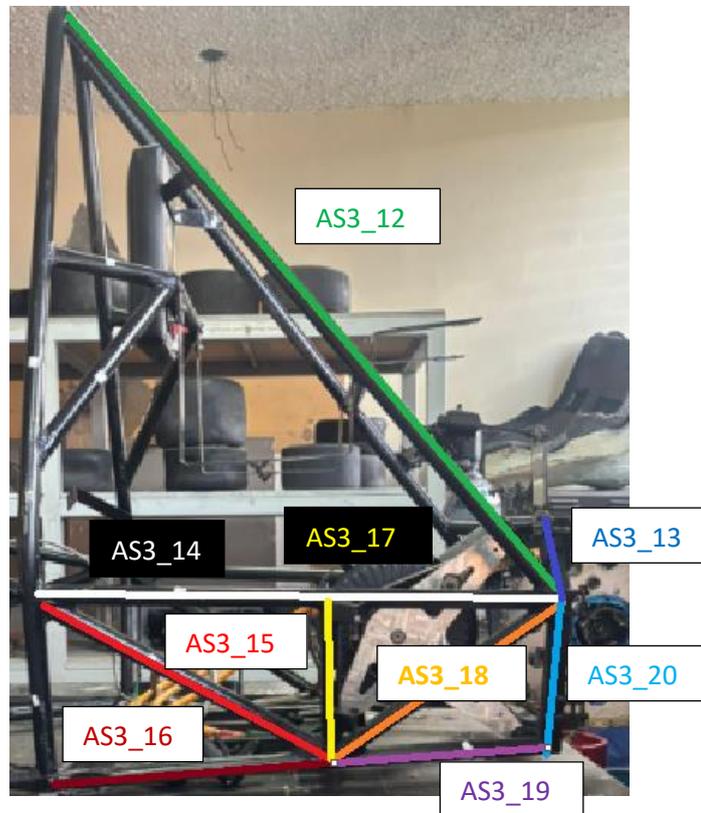
Para registrar las inclinaciones de los componentes tubulares se emplea la siguiente denominación: “AS3_1”, que representa a los ángulos de la sección 3 “AS3” y el número que se encuentra después de guion cambia según la inclinación con respecto al miembro tubular. A continuación, se evidencia el registro de los ángulos tomados:

Figura 41. Registro de ángulos vista izquierda.



Fuente: autores.

Figura 42. Registro de ángulos vista derecha.

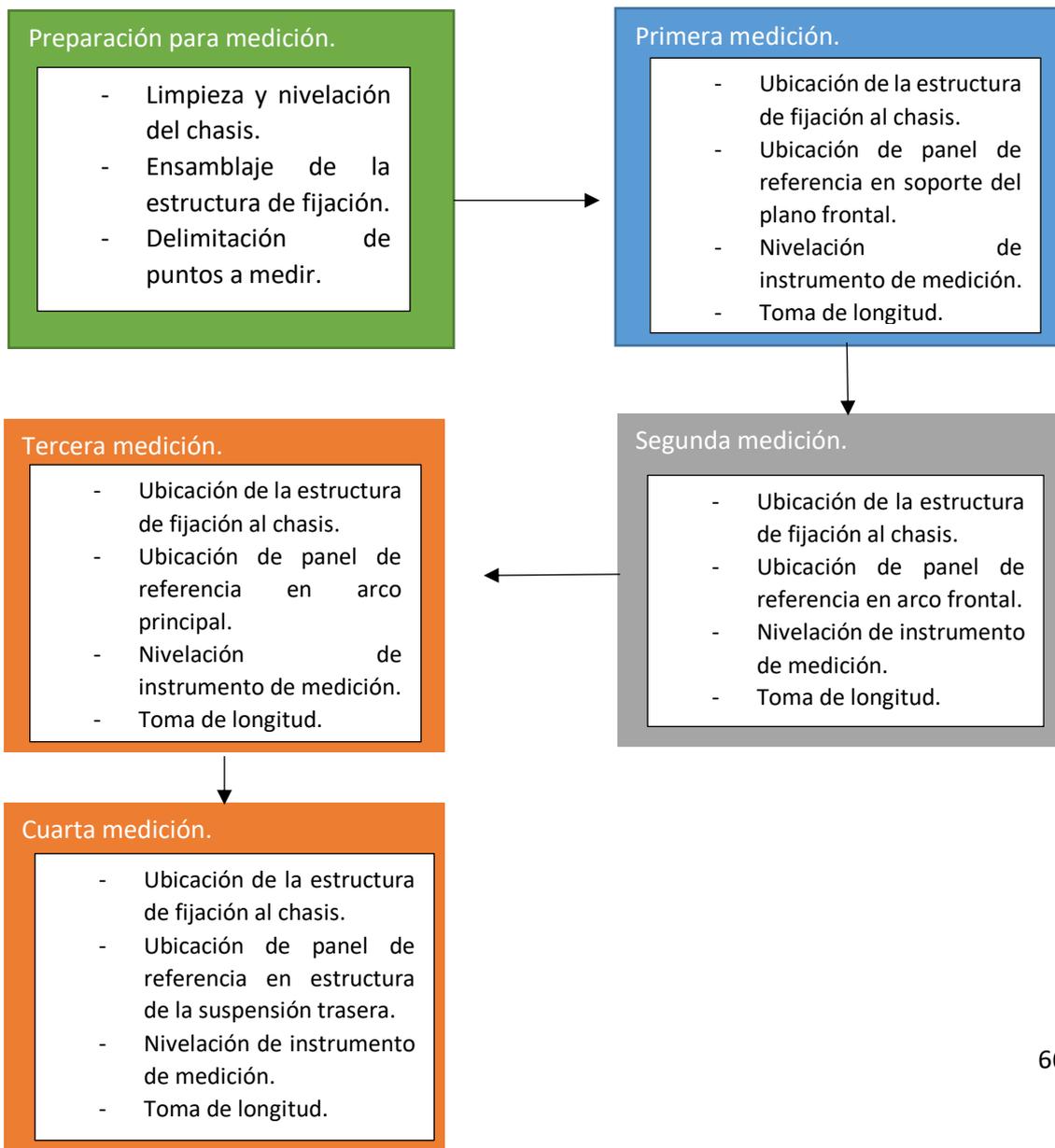


Fuente: autores.

5.2.3 Mediciones longitudinales y transversales.

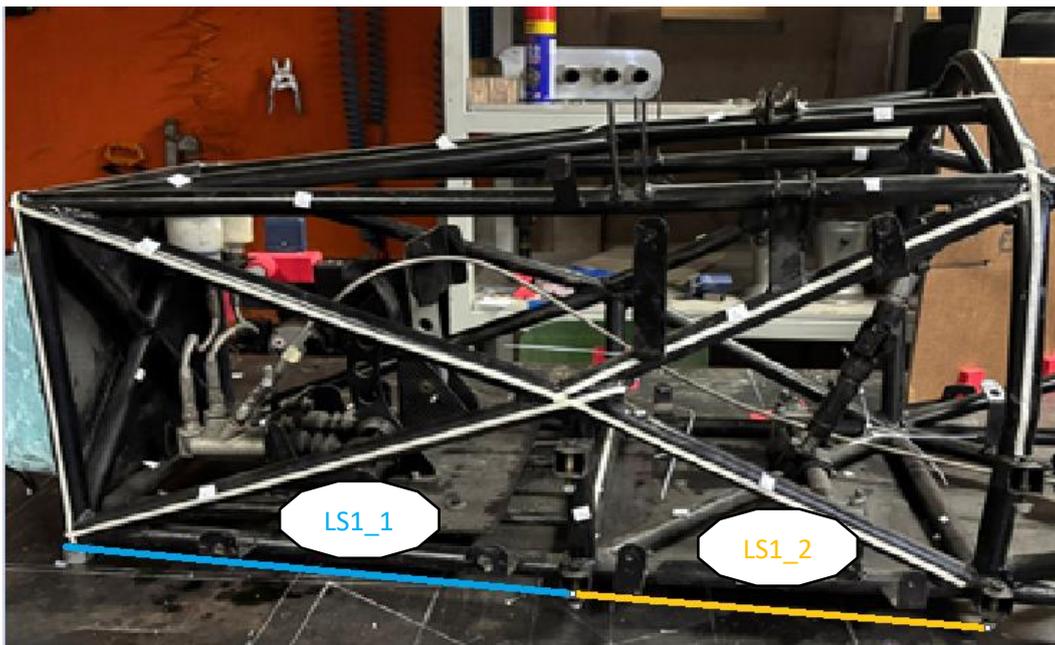
Para medir longitudes, se diseñó una estructura de fijación para los instrumentos de medición en un software CAD. El diseño se basó en el diámetro del tubo empleado en el chasis, dimensiones del medidor de distancia laser y el espesor del panel de referencia.

El proceso de medición de longitud consiste en identificar puntos claves en cada sección. La primera medida va desde el atenuador de impacto frontal hasta los soportes del plano frontal y el arco frontal. Luego, se fija la estructura para los instrumentos de medición y se siguen los pasos del flujograma. La segunda medición se realiza desde el atenuador de impacto frontal hasta el arco principal y la última desde el atenuador de impacto frontal hasta la estructura de suspensión trasera.



Para registrar las inclinaciones de los componentes tubulares se emplea la siguiente denominación: “LS1_1”, que representa las longitudes de la sección 1 “LS1 y el número que se encuentra después de guion cambia según la inclinación con respecto al miembro tubular. A continuación, se evidencia el registro de las longitudes tomados:

Figura 43. Ubicación de longitud en la sección 1.



Fuente: autores.

LS1_1, es la primera medida de longitud en ser tomada, se delimita desde el atenuador de impacto frontal hasta el soporte lateral.

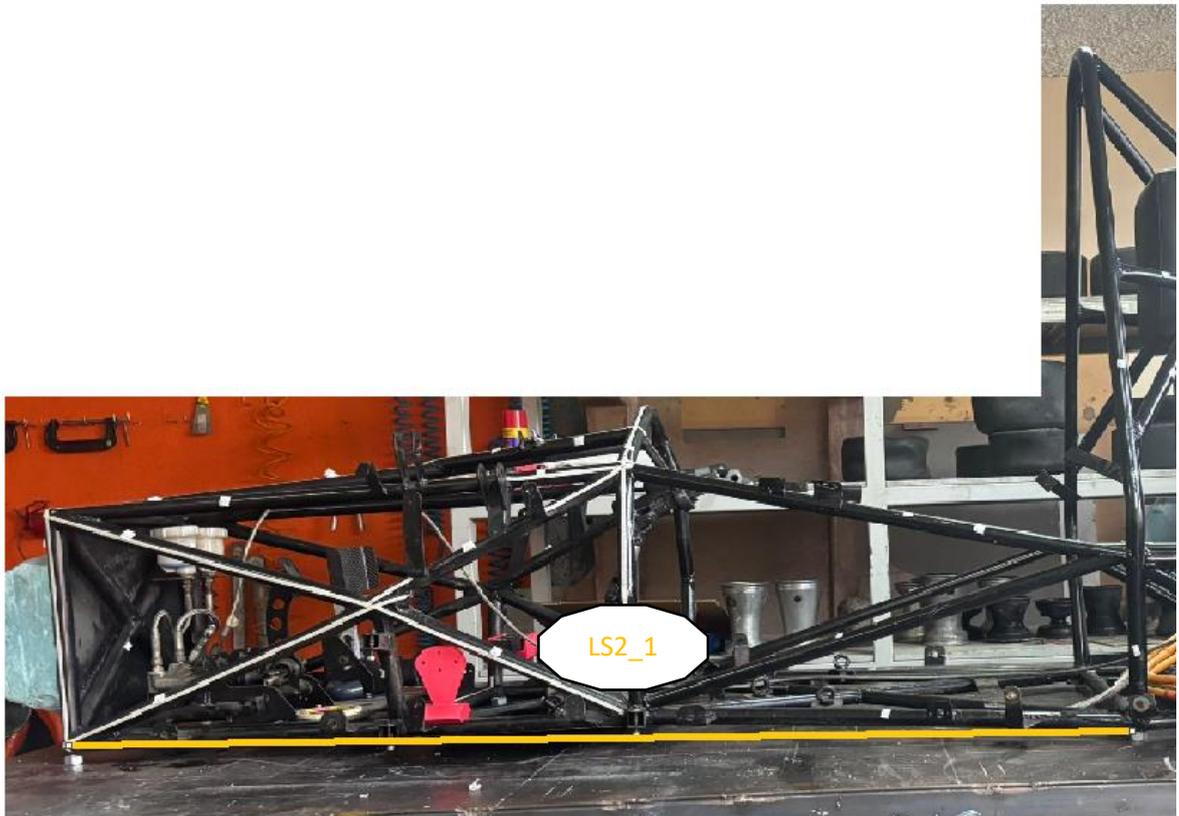
LS1_2, es la segunda medida de longitud en ser tomada, se delimita desde el atenuador de impacto frontal hasta su arco frontal.

- **Sección 2.**

Para registrar las inclinaciones de los componentes tubulares se emplea la siguiente denominación: “LS2_1”, que representa las longitudes de la sección 2 “LS2 y el número

que se encuentra después de guion cambia según la inclinación con respecto al miembro tubular. A continuación, se evidencia el registro de las longitudes tomados:

Figura 44. Ubicación de longitud en la sección 2.



Fuente: autores.

LS2_1, se mide desde el atenuador de impacto frontal hasta el arco principal.

- **Sección 3.**

Para registrar las inclinaciones de los componentes tubulares se emplea la siguiente denominación: “LS3_1”, que representa las longitudes de la sección 3 “LS3 y el número que se encuentra después de guion cambia según la inclinación con respecto al miembro tubular. A continuación, se evidencia el registro de las longitudes tomados:

Figura 45. Ubicación de longitud en la sección 3.

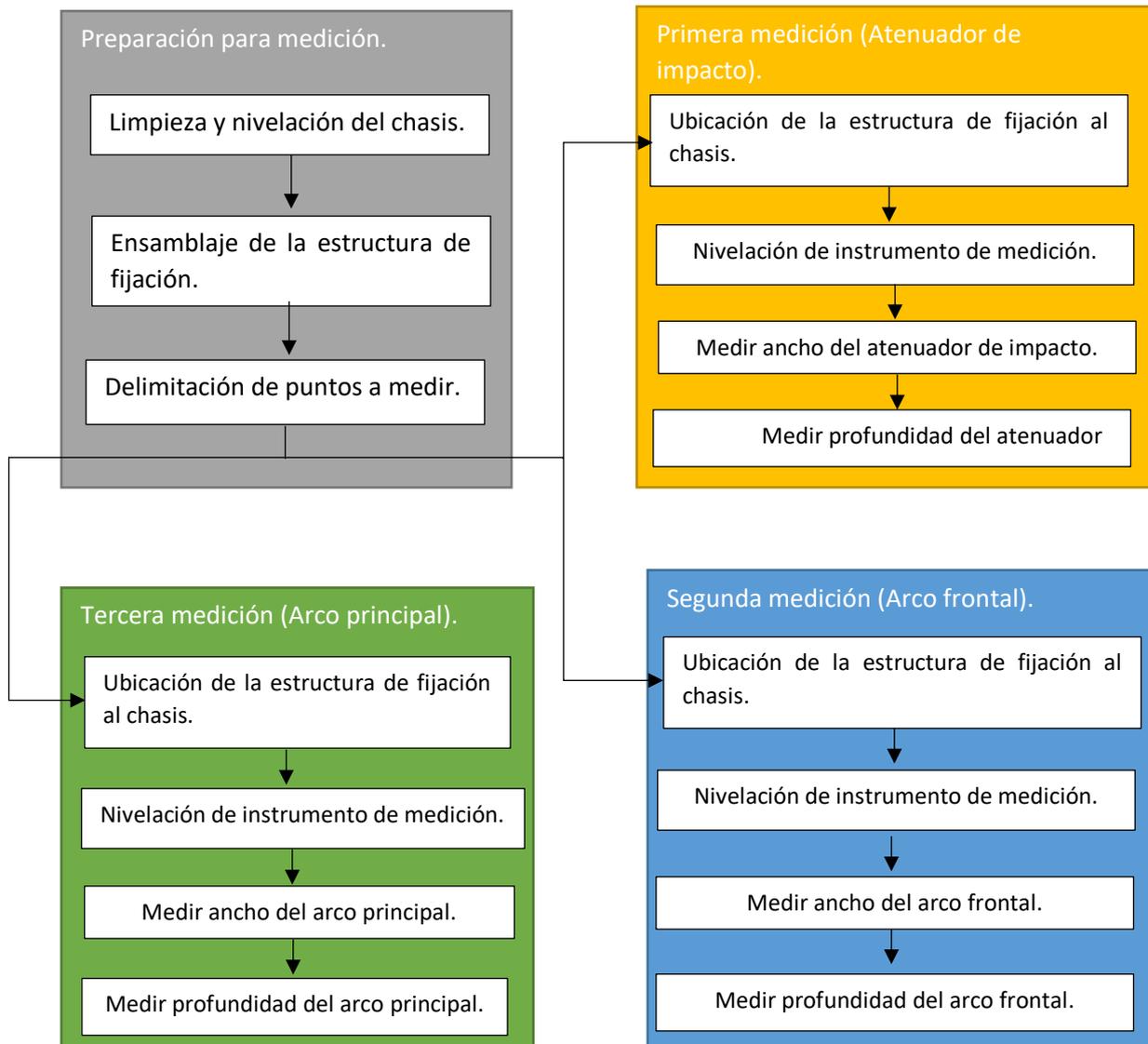


Fuente: autores.

LS3_1, la medición se delimita desde el atenuador de impacto frontal hasta la estructura de la suspensión trasera.

Para las mediciones referentes al ancho, tenemos que definir los anchos determinantes en las estructuras, entre ellos están el atenuador de impacto frontal, arco frontal y principal y la estructura de la suspensión trasera. Se emplea la misma estructura de fijación para los instrumentos de medición en la toma de datos que son sencillas, pero en caso como el arco principal y frontal se debe preparar una estructura de fijación especial.

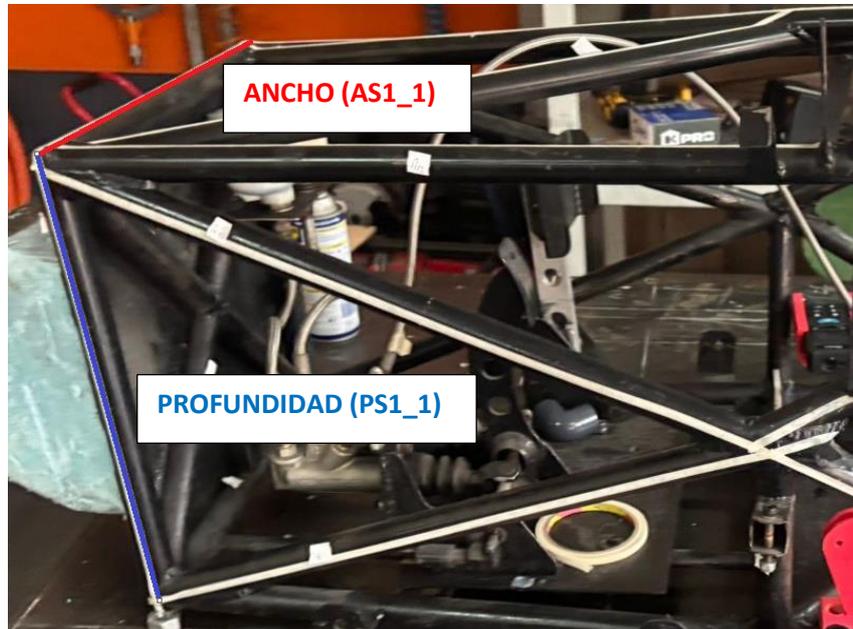
Para medir el ancho, la estructura de fijación para los instrumentos de medición debe adaptarse utilizando tubos y codos PVC, de modo que permita al medidor de distancia ubicarse en una posición adecuada para realizar la medición.



- **Sección 1.**

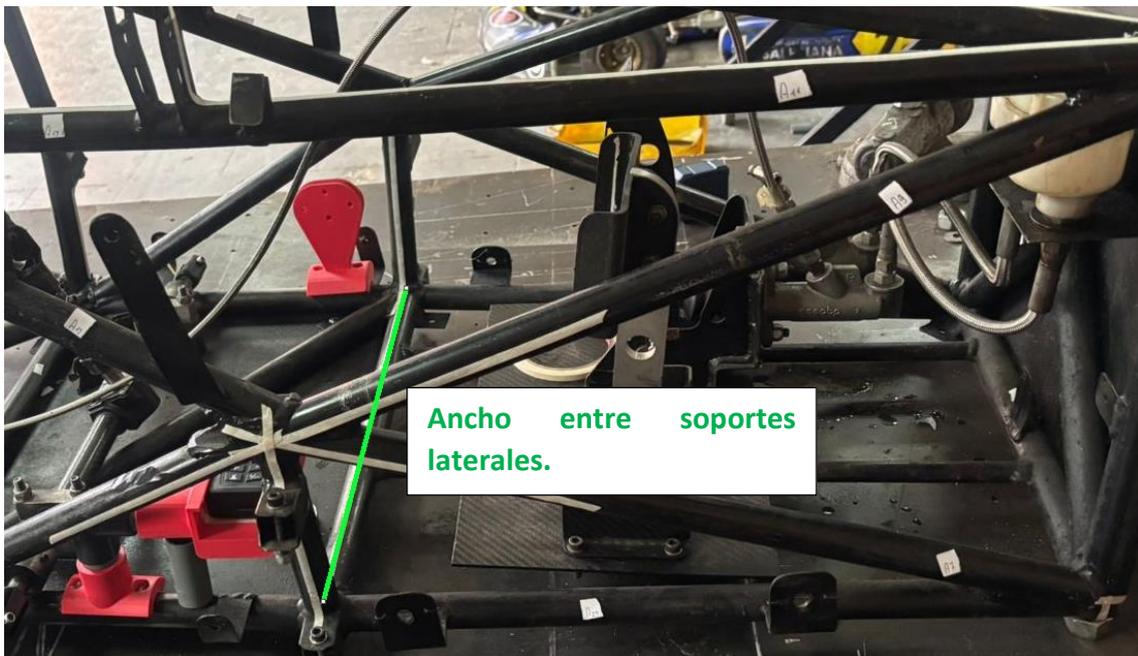
En la sección 1, se mide el ancho de estructuras tales como el atenuador de impacto frontal, entre los soportes laterales y el arco frontal. Midiendo el ancho y profundo del atenuador de impacto permite generar la pieza datum para comenzar a modelar en el software CAD, entre los soportes laterales existe el ancho que determinar la base del arco frontal del chasis, sin embargo, se debe medir dos anchos más y determinar los punto donde los componentes tubulares.

Figura 46. Atenuador de impacto frontal.



Fuente: autores.

Figura 47. Ancho entre soporte lateral.



Fuente: autores.

Figura 48. Ancho de arco frontal.

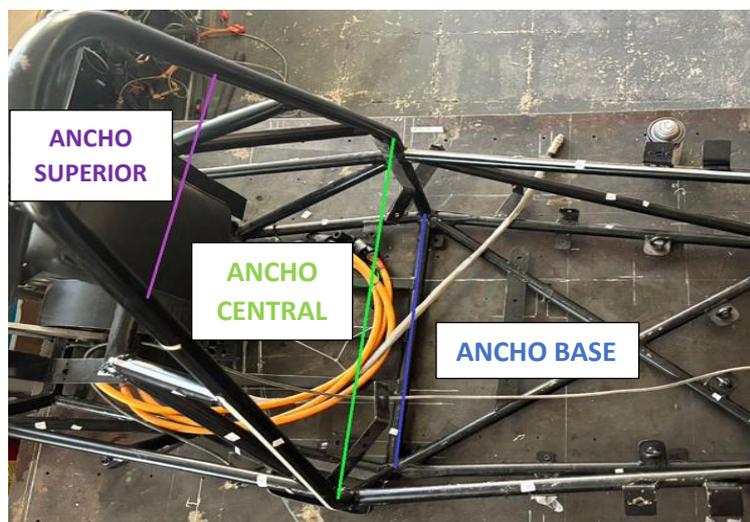


Fuente: autores.

- **Sección 2.**

En la sección 2, se mide los anchos del arco principal, exactamente el ancho base, el central y superior. Con el ancho del arco principal, se logra delimitar el ancho hasta esta sección, tomando como pieza datum el ancho del arco frontal.

Figura 49. Anchos del arco principal.

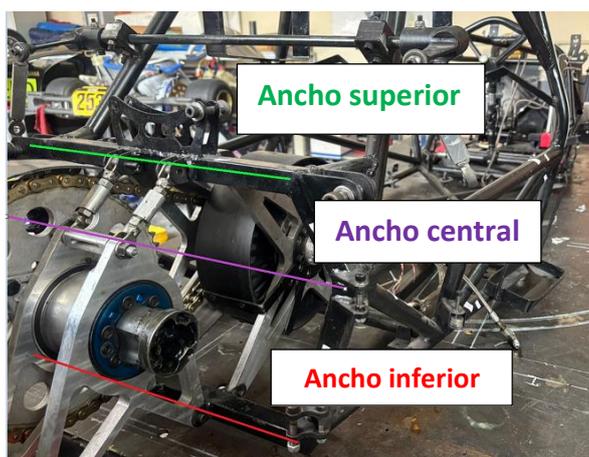


Fuente: autores.

- **Sección 3.**

Para finalizar, en la sección 3 se mide la estructura para la suspensión trasera teniendo tres anchos diferentes el base, central y superior. Logrando completar el ancho final restante de la estructura.

Figura 50. Ancho de la estructura para suspensión trasera.



Fuente: autores.

5.3 Instrumentos y complementos de medición.

La instrumentación empleada en la medición es totalmente digital, tanto para medir ángulo como longitudes debido a que se requería una gran precisión en las mediciones realizadas, algo que no se puede lograr con instrumentos manuales como flexómetro para las longitudes y goniómetro para los ángulos, una mayor facilidad de uso para realizar las mediciones siendo más rápidas y fáciles de interpretar y la reducción de errores humanos ya que elimina la necesidad de ajustar manualmente.

5.3.1 Instrumentos.

- **Inclinómetro**

La medición de ángulos en la estructura se realiza con inclinómetro digital, que garantiza la precisión y confiabilidad al momento de realizar una medición.

Figura 51. Instrumento de medición.



Fuente: autores.

El inclinómetro digital pertenece a la marca “SHAHE”, tiene los siguientes parámetros técnicos:

Tabla 7. Parámetros técnicos de inclinómetro.

Parámetros técnicos.

Rango de medición	4*90°
Resolución	0.05°
Precisión	±0,2
Repetibilidad	0,1°
Temperatura de trabajo	-10 a 50°C

Fuente: autores.

- **Medidor de distancia laser.**

La longitud y ancho, se mide con un medidor de distancia laser de clase 2 según la normativa IEC 60825-1, este tipo de instrumento es de gran utilidad y su versatilidad para realizar medición del chasis.

Figura 52. Medidor de distancia laser.



Fuente: autores.

El medidor de distancia laser de la marca “KPRO”, tiene los siguientes parámetros técnicos:

Tabla 8. *Parámetros técnicos de medidor de distancia laser.*

Parámetros técnicos.

Rango de medición 0.05-20/40/100m

Precisión de medición ±2 mm

Unidad de precisión de medición	m, ft, in
Temperatura de funcionamiento	0 – 40°C
Dimensiones	120x50x25 mm
Tipo laser	620-690nm, < 1nW
Peso	92g

Fuente: autores.

5.3.2 Estructura de fijación para instrumento de medición.

La estructura de fijación es un diseño creado para minimizar variaciones en las mediciones. A diferencia del flexómetro, que puede generar inconsistencias, esta estructura permite usar el medidor de distancia laser, reduciendo la cantidad de errores en la toma de longitudes.

- **Angulo.**

Para los ángulos, no es necesario diseñar alguna estructura de fijación debido a que el inclinómetro cuenta con una base magnética que me permite fijar el instrumento de medición al chasis.

Figura 53. Inclinómetro con base magnética.

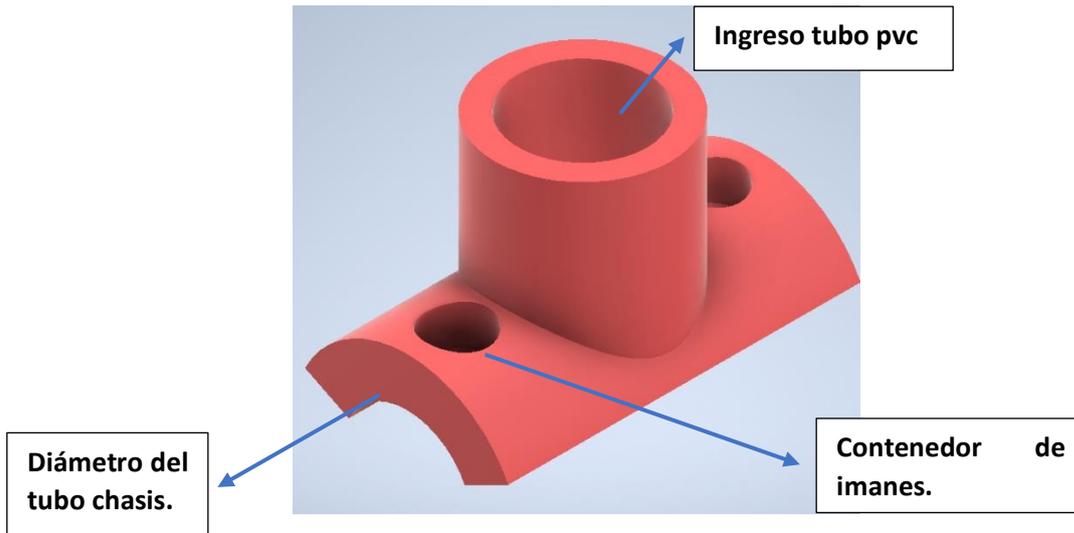


Fuente: autores.

- **Longitud.**

La estructura de fijación para el medidor de distancia consiste en un ensamblaje de piezas impresas 3D, codos y tubos PVC. Su función es registrar con precisión el largo y ancho de la estructura. El primer componente de la estructura de fijación es el anclaje chasis, presenta un diámetro en el base adaptado al componente estructural del chasis, un peso de 26 gramos y la capacidad de albergar un tubo de PVC en la parte superior para ensamblar la estructura. Además, cuenta con agujeros diseñados para contener imanes.

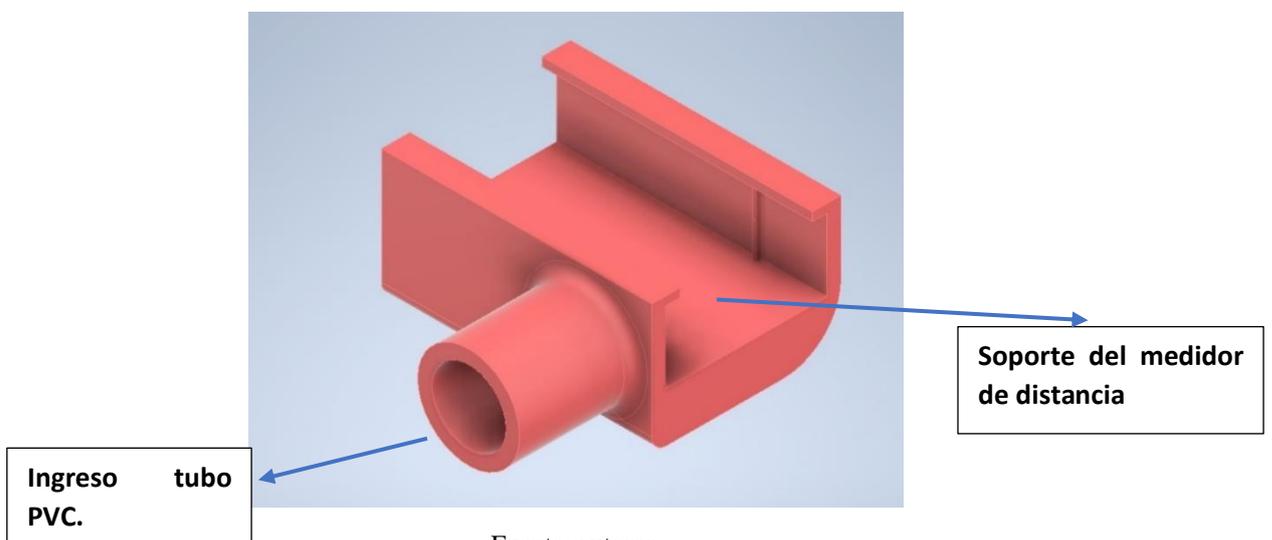
Figura 54. Anclaje para el chasis.



Fuente: autores.

El soporte del medidor de distancia está diseñado para bloquear el movimiento, asegurando estabilidad durante su uso. Además, permite acoplar un tubo PVC con el mismo diámetro del que se utilizó en el anclaje del chasis. El soporte tiene un peso de 88 gramos.

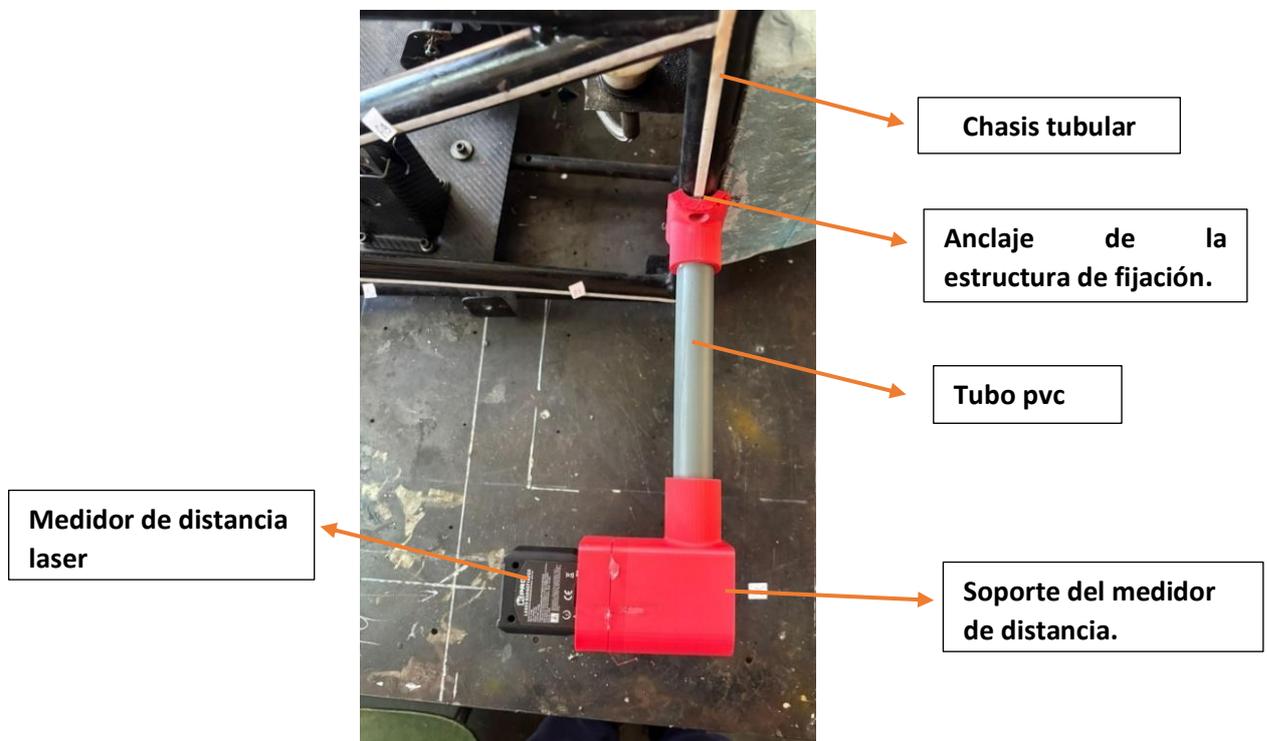
Figura 55. Soporte del medidor de distancia.



Fuente: autores.

Para medir la longitud de los puntos establecidos, se debe ensamblar la estructura de fijación al chasis que asegure el instrumento de medición y permita obtener lectura clara y precisa. Dicho ensamblaje se representará en la figura

Figura 56. Estructura de fijación para medidor de distancia.



Fuente: autores.

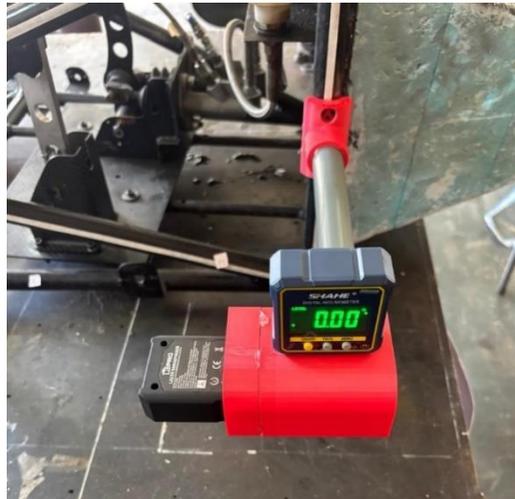
Cabe destacar que, para realizar las mediciones, fue necesario nivelar el soporte de fijación del medidor de distancia laser, el cual se ancla al chasis en la parte frontal del chasis y ubicar el medidor de la manera que se ilustra en la figura.

Figura 57. Posición del medidor de distancia.



Fuente: autores.

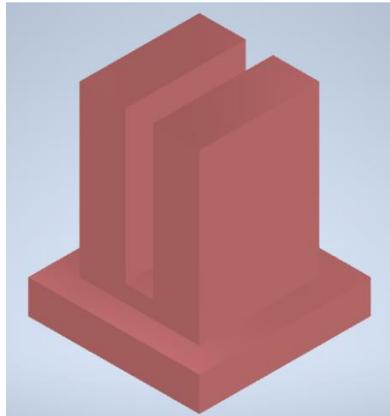
Figura 58. Nivelación del medidor de distancia.



Fuente: autores.

Para tener una buena de referencia, se diseñó soportes que contengan al panel de referencia, dichos soportes permiten nivelar y orientar de manera rápida con respecto al punto de referencia. Cuenta con una extrusión de recorte en su parte central de 8 mm para que ingrese el panel de referencia y cuenta con un peso de 29 gramos.

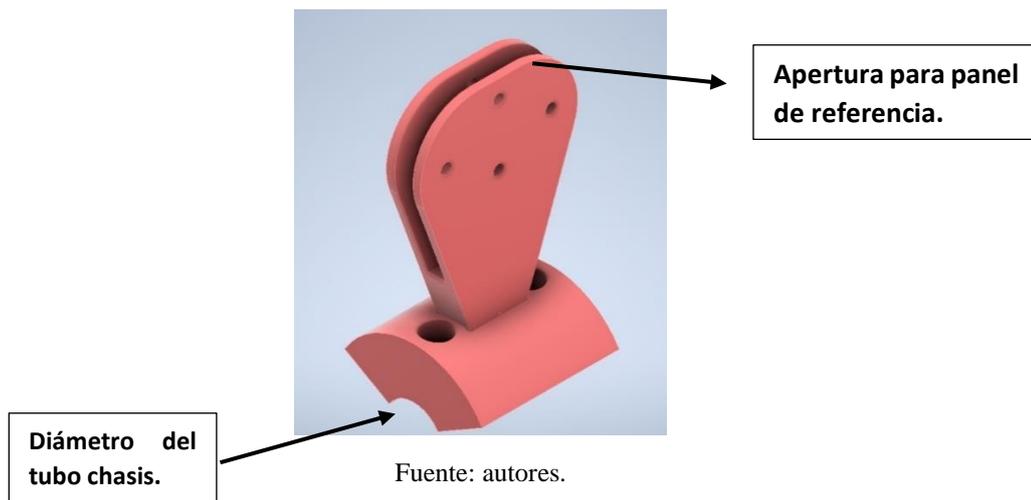
Figura 60. Soporte para panel de referencia.



Fuente: autores.

El soporte de referencia tiene como función sujetar el panel de referencia para simular un límite centrado a la mitad del tubo al chasis. El soporte se ancla al chasis de manera similar al soporte del medidor de distancia, contando con una abertura de 8 mm, permitiendo la entrada del panel de referencia. Cuenta con un peso de 75 gramos.

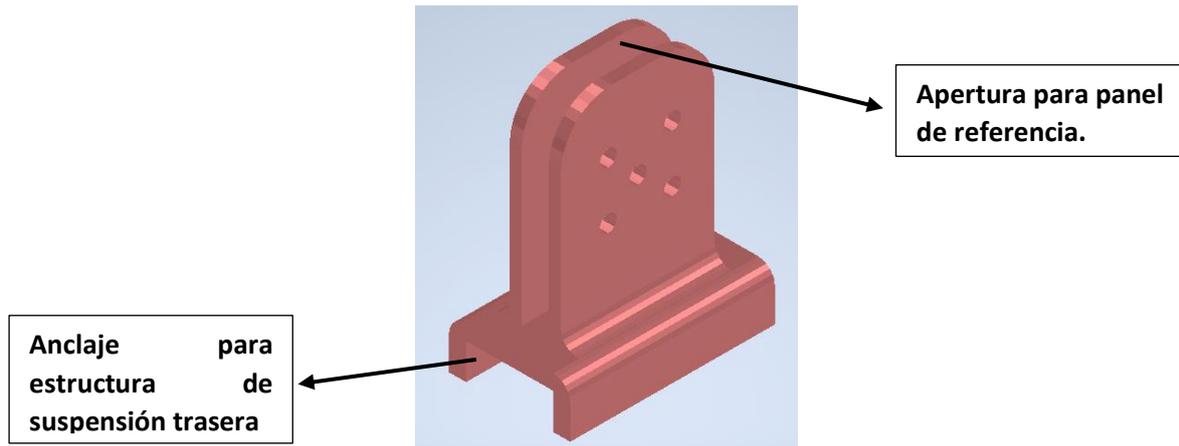
Figura 61. Anclaje para panel de referencia.



Fuente: autores.

Para la parte posterior contamos con una geometría de tubo diferente, un tubo cuadrado de 25.4 mm por 25.4 mm, por eso necesitamos un anclaje diferente para realizar las mediciones.

Figura 62. Anclaje de referencia posterior.



Fuente: autores.

La unión de estos elementos me permite fijar desde el chasis, el panel de referencia empleado para simular la referencia de medición, dando el siguiente resultado:

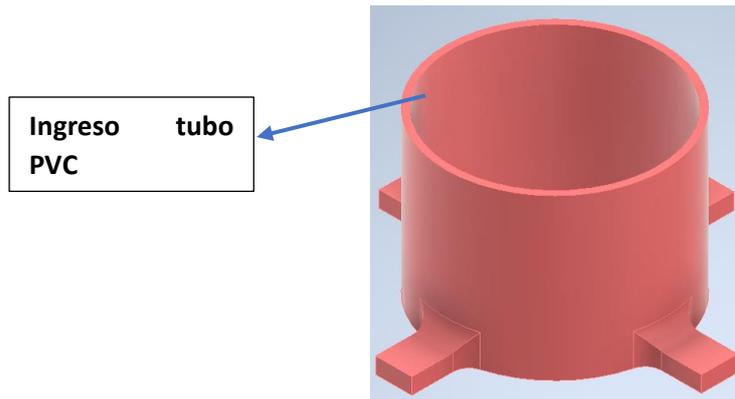
Figura 63. Estructura de referencia.



Fuente: autores.

Para la medir el ancho y profundo de la geometría diseñada para la suspensión trasera, se diseñó un soporte que puede sostener el tubo PVC. Este soporte permite montar la base para la estructura de fijación y facilitar la medición del ancho y largo del componente estructural, que tiene forma cubica.

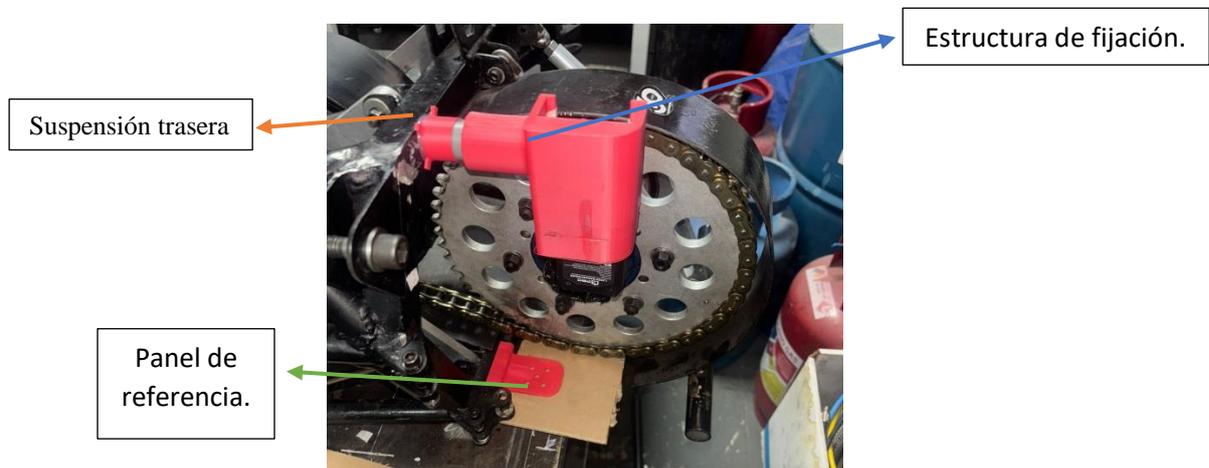
Figura 64. Base para fijación geometría suspensión trasera.



Fuente: autores.

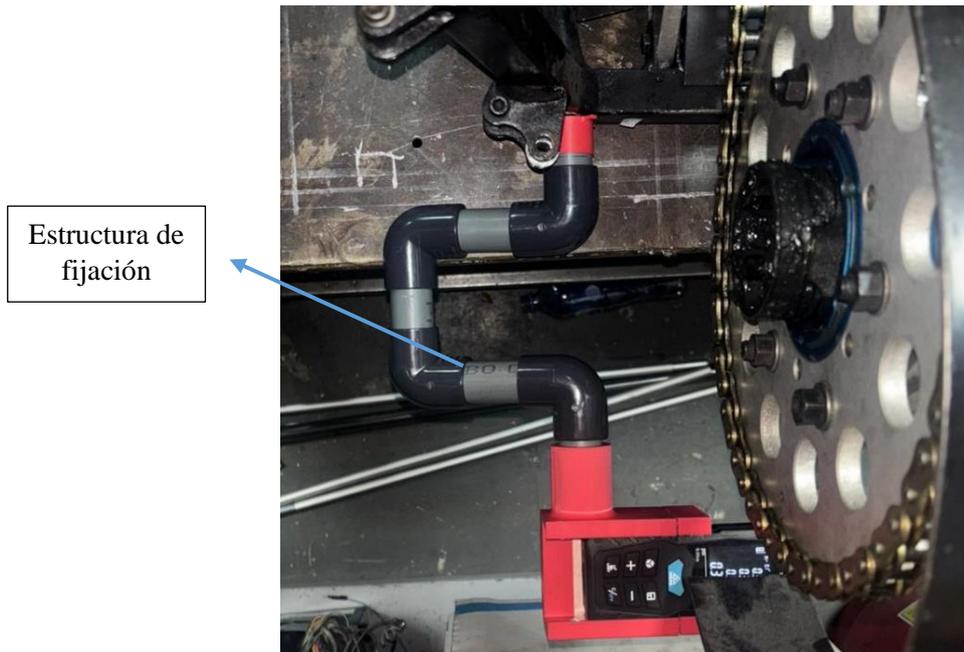
Una vez ensamblado la estructura de fijación dependiendo la variable a medir, las posibles configuraciones se representan a continuación:

Figura 65. Configuración para medir profundidad.



Fuente: autores

Figura 66. Configuración para medir ancho.



Fuente: autores

5.4 Estadística descriptiva de las mediciones.

El uso de estadística descriptiva en la medición de un chasis tubular es clave para garantizar la calidad y precisión del proceso, permitiendo analizar la consistencia de los datos obtenidos, identificar posibles errores o valores atípicos y calcular medidas como la media, el rango y la desviación estándar para evaluar la variabilidad de las mediciones. Este enfoque sistemático proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas en el análisis y diseño del chasis.

5.4.1 Análisis estadístico de las mediciones angulares

- **Sección 1.**

Para la sección 1 se obtuvo un total de 34 ángulos, y un total de 204 mediciones obteniendo seis mediciones por cada ángulo antes mencionado. Para ello se empleó un software de análisis estadístico, obteniendo medidas de tendencia central.

Figura 67. Resultados obtenidos sección 1.

Variable	Mean	StDev	Variance	Median	Mode	N for Mode
AS1_1	0,267	0,248	0,062	0,250	0; 0,25	2
AS1_2	89,375	0,383	0,147	89,350	*	0
AS1_3	89,642	0,481	0,231	89,900	90	2
AS1_4	45,083	0,0983	0,0097	45,075	45,05; 45,1	2
AS1_5	44,917	0,129	0,0167	44,925	*	0
AS1_6	0,3583	0,0970	0,0094	0,3750	0,45	2
AS1_7	21,600	0,0837	0,0070	21,625	21,5; 21,65	2
AS1_8	22,317	0,169	0,0287	22,350	22,35	2
AS1_9	17,400	0,114	0,0130	17,375	17,3	3
AS1_10	16,925	0,221	0,0487	16,975	*	0
AS1_11	2,1333	0,0983	0,0097	2,1000	2,1	3
AS1_12	2,2667	0,1033	0,0107	2,2500	2,25	2
AS1_13	78,717	0,151	0,0227	78,725	*	0
AS1_14	78,717	0,289	0,084	78,850	78,35; 78,95	2
AS1_15	28,483	0,211	0,0447	28,450	*	0
AS1_16	28,342	0,139	0,0194	28,350	28,4	2
AS1_17	27,817	0,0983	0,0097	27,775	27,75	3
AS1_18	28,400	0,176	0,0310	28,450	28,55	2
AS1_19	3,683	0,248	0,062	3,550	3,5	3
AS1_20	3,6917	0,2354	0,0554	3,6250	*	0
AS1_21	8,1417	0,0665	0,0044	8,1500	8,15	3
AS1_22	7,0667	0,0606	0,0037	7,0750	7; 7,1	2
AS1_23	7,6833	0,1211	0,0147	7,7000	7,7	2
AS1_24	5,4833	0,0683	0,0047	5,5000	5,5	4
AS1_25	8,4333	0,2229	0,0497	8,4750	*	0
AS1_26	6,2333	0,0753	0,0057	6,2500	6,25; 6,3	2
AS1_27	27,558	0,208	0,0434	27,600	27,6	3
AS1_28	27,608	0,0970	0,0094	27,575	27,55	2
AS1_29	1,0500	0,1924	0,0370	1,0000	0,95	2
AS1_30	1,1417	0,1068	0,0114	1,1500	1,25	2
AS1_31	1,2917	0,0585	0,0034	1,3000	1,3; 1,35	2
AS1_32	1,1083	0,0861	0,0074	1,1250	1,1; 1,15	2
AS1_33	0,6000	0,0949	0,0090	0,6000	0,5; 0,6	2
AS1_34	0,3417	0,2223	0,0494	0,3500	*	0

Fuente: autores.

- **Sección 2.**

Para la sección 2 se obtuvo un total de 18 ángulos, y un total de 108 mediciones obteniendo seis mediciones por cada ángulo antes mencionado. Para ello se empleó un software de análisis estadístico, obteniendo medidas de tendencia central.

Figura 68. Resultados obtenidos sección 2.

Variable	Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode	N for Mode
AS2_1	12,025	0,371	0,138	3,09	12,150	*	0
AS2_2	45,3	66,6	4433,1	147,01	18,1	18	2
AS2_3	1,5000	0,1265	0,0160	8,43	1,4750	1,65	2
AS2_4	1,2417	0,1201	0,0144	9,67	1,2500	1,2; 1,3	2
AS2_5	1,300	0,391	0,153	30,09	1,100	1,1; 1,8	2
AS2_6	80,975	0,0612	0,0037	0,08	81,000	81	3
AS2_7	0,3083	0,0917	0,0084	29,75	0,3000	0,3	3
AS2_8	70,542	0,153	0,0234	0,22	70,600	70,35; 70,6	2
AS2_9	56,925	0,461	0,213	0,81	56,725	*	0
AS2_10	10,808	0,929	0,862	8,59	10,800	10,8	2
AS2_11	17,017	0,270	0,073	1,58	17,000	17	2
AS2_12	12,525	0,178	0,0317	1,42	12,600	12,3; 12,6	2
AS2_13	1,983	0,286	0,082	14,41	1,925	*	0
AS2_14	79,942	0,0492	0,0024	0,06	79,950	79,95	4
AS2_15	71,092	0,159	0,0254	0,22	71,075	*	0
AS2_16	52,700	0,286	0,082	0,54	52,650	52,45	2
AS2_17	8,417	0,378	0,143	4,49	8,275	*	0
AS2_18	0,2000	0,0894	0,0080	44,72	0,2000	0,1; 0,2; 0,3	2

Fuente: autores.

- **Sección 3.**

Para la sección 3 se obtuvo un total de 21 ángulos, y un total de 126 mediciones obteniendo seis mediciones por cada ángulo antes mencionado. Para ello se empleó un software de análisis estadístico, obteniendo medidas de tendencia central.

Figura 69. Resultados obtenidos sección 3.

Variable	Mean	StDev	Variance	Median	Mode	N for Mode
AS3_1	1,6667	0,0931	0,0087	1,6750	1,65; 1,75	2
AS3_2	31,983	0,234	0,0547	32,075	32,1	2
AS3_3	2,4000	0,0775	0,0060	2,4500	2,45	4
AS3_4	77,208	0,0665	0,0044	77,200	77,2	3
AS3_5	36,125	0,0880	0,0077	36,150	36,15	4
AS3_6	1,5583	0,1158	0,0134	1,5250	1,45; 1,7	2
AS3_7	51,600	0,285	0,081	51,700	*	0
AS3_8	67,16	8,17	66,75	67,15	74,65	2
AS3_9	67,43	8,43	71,08	67,22	*	0
AS3_10	0,1500	0,1225	0,0150	0,1000	0,1	3
AS3_11	1,2417	0,0376	0,0014	1,2500	1,25	3
AS3_12	51,192	0,285	0,081	51,150	51,25	2
AS3_13	60,800	0,130	0,0170	60,775	*	0
AS3_14	1,5000	0,1449	0,0210	1,4500	1,4	2
AS3_15	30,675	0,204	0,0418	30,650	*	0
AS3_16	2,4083	0,0665	0,0044	2,4500	2,45	4
AS3_17	75,650	0,122	0,0150	75,600	75,55	3
AS3_18	36,542	0,218	0,0474	36,575	36,5	2
AS3_19	1,517	0,275	0,076	1,625	1,75	2
AS3_20	72,183	0,0408	0,0017	72,175	72,15	3
AS3_21	0,0917	0,0665	0,0044	0,1000	0,15	3

Fuente: autores.

5.4.2 Análisis estadístico de las mediciones longitudinales.

- **Sección 1.**

Para la sección 1, se aplicó la misma metodología, obteniendo 12 mediciones totales debido a que solo medimos desde la parte frontal hasta soporte frontales y el arco frontal. Se empleó un software de análisis estadístico, obteniendo medidas de tendencia central.

Figura 70. Resultados obtenido sección 1.

Variable	Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode	N for Mode
LS1_1	51,400	0,316	0,100	0,62	51,450	51,6	2
LS1_2	85,730	0,416	0,173	0,49	85,900	85,9	5

Fuente: autores.

- **Sección 2.**

Para la sección 2, se tomó la misma metodología, tres mediciones aleatorias por cada miembro del proyecto, obteniendo 12 mediciones totales debido a que solo medimos desde el arco frontal hasta el arco principal.

Figura 71. Resultados obtenido sección 2.

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Minimum	Median	Maximum	Mode	N for Mode
LS2_1	157,83	0,0494	0,121	0,0147	0,08	157,60	157,90	157,90	157,9	4

Fuente: autores.

- **Sección 3.**

Para la sección 3, se tomó la misma metodología, tres mediciones aleatorias por cada miembro del proyecto, obteniendo 12 mediciones totales debido a que solo medimos desde la parte frontal hasta soporte frontales y el arco frontal.

Figura 72. Resultados obtenido sección 3.

Variable	Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode	N for Mode
LS3_1	223,90	0,219	0,0480	0,10	223,90	223,7; 224,1	3

|

Fuente: autores.

5.4.3 Análisis estadístico de las mediciones transversales.

- **Sección 1.**

Según los planos constructivos del chasis, el atenuador de impacto frontal presenta dimensiones de 36 cm de ancho y 36 cm de profundidad. Para verificar estas dimensiones, se realizaron una serie de mediciones siguiendo la metodología previamente mencionada.

Figura 73. Resultados obtenidos del atenuador de impacto frontal.

Variable	Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode	N for Mode
ANCHO ATENUADOR	36,017	0,0753	0,0057	0,21	36,000	36	3
PROFUNDIDAD ATENUADOR	36,055	0,000000	0,000000	0,00	36,055	36,055	6

Fuente: autores.

El arco frontal, es otra geometría a medir y que es determinante en el ancho de la estructura tubular, teniendo tres anchos a ser medidos base, medio y superior. Además de tres alturas, base, medio y superior.

Figura 74. Resultados obtenidos del arco frontal.

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode	N for Mode
ANCHO BASE	44,383	0,0422	0,103	0,0107	0,23	44,350	44,35	3
ANCHO SUPERIOR	51,983	0,0167	0,0408	0,0017	0,08	52,000	52	5
ALTO BASE	19,770	0,000000	0,000000	0,000000	0,00	19,770	19,77	6
ALTO MEDIO	37,267	0,0760	0,186	0,0347	0,50	37,300	37,3	2
ALTO SUPERIOR	50,970	0,000000	0,000000	0,000000	0,00	50,970	50,97	6

Fuente: autores.

- **Sección 2.**

El arco principal, es determinarte en el ancho de la estructura tubular, teniendo tres anchos a ser medidos base, medio y superior. Además de dos alturas, base y superior.

Figura 75. Resultados obtenidos del arco principal.

Variable	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode
ANCHO BASE	6	0	57,083	0,0422	0,103	0,0107	0,18	57,050	57,05
ANCHO MEDIO	6	0	67,717	0,0211	0,0516	0,0027	0,08	67,750	67,75
ANCHO SUPERIOR	6	0	42,500	0,0365	0,0894	0,0080	0,21	42,500	42,4; 42,5; 42,6
LARGO MEDIO	6	0	31,833	0,117	0,288	0,083	0,90	31,750	31,6
LARGO SUPERIOR	6	0	109,00	0,0494	0,121	0,0147	0,11	109,07	109,07

Fuente: autores.

- **Sección 3.**

La suspensión trasera, es determinarte en el ancho de la estructura tubular, teniendo tres anchos a ser medidos base, medio y superior. Además de tres alturas, base, medio y superior.

Figura 76. Resultados obtenidos estructura de la suspensión trasera.

Variable	Mean	SE Mean	StDev	Variance	CoefVar	Median	Mode	N for Mode
ANCHO BASE	34,583	0,0307	0,0753	0,0057	0,22	34,600	34,6	3
ANCHO MEDIO	40,083	0,0307	0,0753	0,0057	0,19	40,100	40,1	3
ANCHO SUPERIOR	36,283	0,138	0,337	0,114	0,93	36,500	36,5	4
ALTO SUPERIOR	30,317	0,0167	0,0408	0,0017	0,13	30,300	30,3	5
ALTO MEDIO	20,817	0,0167	0,0408	0,0017	0,20	20,800	20,8	5

Fuente: autores.

5.5 Materiales.

5.5.1 Acero SAE 4130

La aleación de acero 4130, según la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), es un material de bajo carbono enriquecido con cromo y molibdeno como elementos principales. Estos componentes mejoran su resistencia a la corrosión y su dureza, lo que refuerza sus propiedades mecánicas. Este tipo de acero destaca por su tenacidad, facilidad

para ser soldado y trabajado, mientras que sus propiedades físicas dependen de la composición química y la microestructura, que pueden modificarse mediante el proceso de conformado empleado. Es un material ampliamente utilizado en la fabricación de componentes estructurales, siendo más efectivo en piezas medianas enfriadas en agua y en piezas pequeñas. (Santos, 2024) .

Tabla 9. *Propiedades Mecánicas del Acero 4130.*

Deformación Estática	436 MPA
Límite de Resistencia a la Tracción	669 MPA
Elongación	25%
Dureza	93 RB
Módulo de Elasticidad	205 GPa

Fuente: Santos, S. (2024).

5.6 Conclusión de la Ingeniería Inversa.

La aplicación de la ingeniería inversa en la medición del chasis tubular permitió identificar desniveles entre los componentes tubulares. Por ejemplo, a través de la medición de ángulos, se detectaron irregularidades en la alineación de los tubos, así como un desnivel general de la estructura con respecto a la mesa de trabajo. Para documentar estas anomalías, se realizaron registros fotográficos que evidencian el problema identificado.

Sección 1.

El atenuador frontal del chasis tiene ciertas peculiaridades, tales como, la diferencia de ángulo de los miembros estructurales. Para ello, se conforman pareja de miembros tubulares que comparten la misma orientación.

Tabla 10. Diferencia entre AS1_1 y AS1_6.

Diferencia de ángulo.

Componente tubular.	Estructura.	Ángulo.	Diferencia
AS1_1	Atenuador de	0°	0,45°
AS1_6	impacto frontal.	0,45°	

Tabla 11. Diferencia entre AS1_2 y AS1_3.

Diferencia de ángulo.

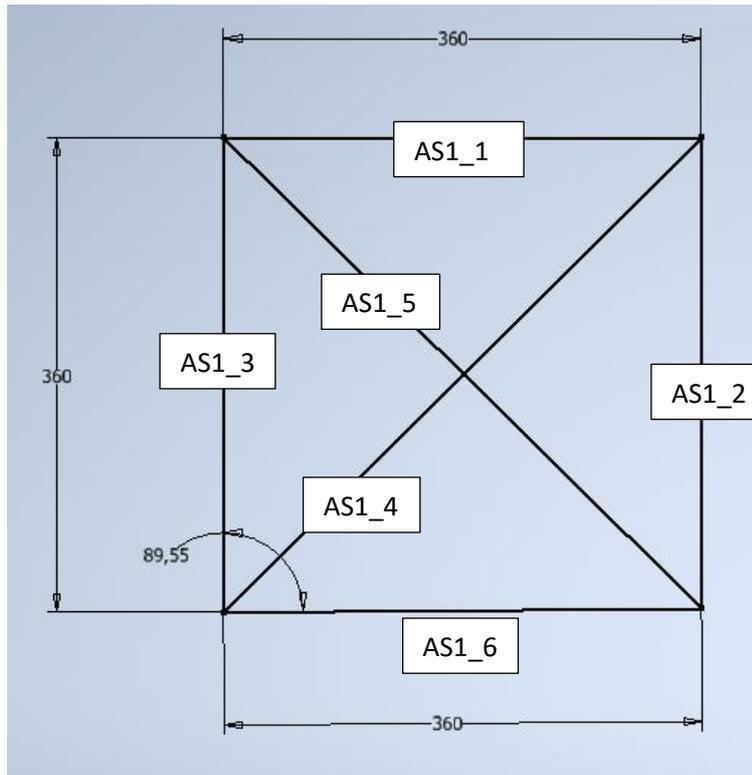
Componente tubular.	Estructura.	Ángulo.	Diferencia
AS1_2	Atenuador de	89,35°	0,65°
AS1_3	impacto frontal.	90°	

Tabla 12. Diferencia entre AS1_4 y AS1_5.

Diferencia de ángulo.

Componente tubular.	Estructura.	Ángulo.	Diferencia
AS1_4	Atenuador de	45,05°	0,125°
AS1_5	impacto frontal.	44,925°	

Figura 77. Vista frontal del atenuador de impacto en software CAD.



Fuente: Autores.

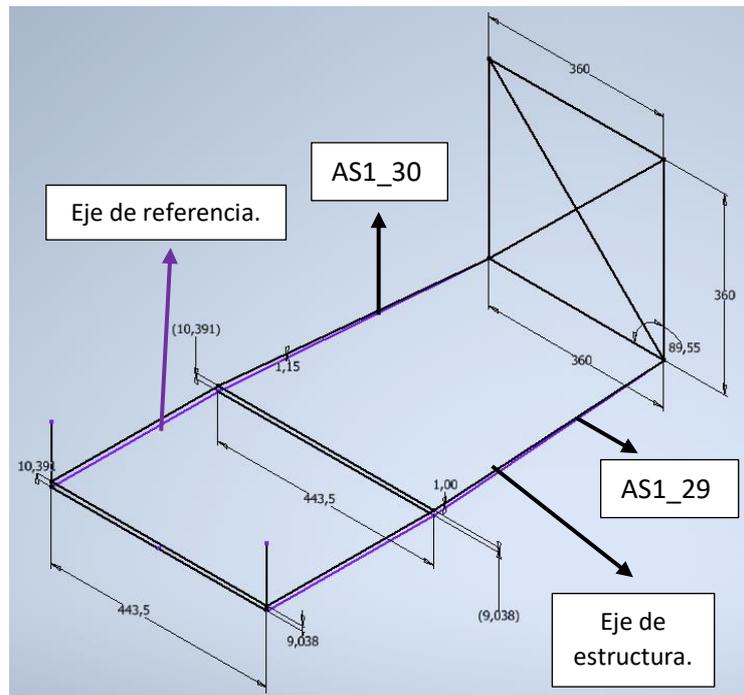
En la sección 1, se evidencia un desnivel del lado derecho de la estructura tomando la vista frontal como referencia, dicho desnivel se puede apreciar desde el atenuador del impacto frontal. Del lado derecho tomando un eje completamente recto de color morado en la figura. Se evidencia una altura de 10,4 mm de diferencia entre el eje de referencia y el eje empleado para replicar la estructura. En cambio, del lado izquierdo se evidencia una diferencia entre el eje de referencia y el eje empleado para replicar la estructura de 9,04 mm.

Tabla 13. Diferencia entre AS1_29 y AS1_30.

Desnivel de estructura.

Componente tubular.	Altura de desnivel.	Ángulo.
AS1_29	9,04 mm	1°
AS1_30	10,4 mm	1.60°

Figura 78. Atenuador de impacto en software CAD.



Fuente: Autores.

Otro defecto de la estructura, se evidencia en el AS1_11 y AS1_19, AS1_12 y AS1_20 siendo el mismo componente tubular, pero con ángulos diferentes, por efecto de la suspensión delantera o afectaciones por la soldadura. A continuación, se evidencia mediante las tablas y la figura.

Tabla 14. Diferencia entre AS1_11 y AS1_19.

Diferencia del ángulo.

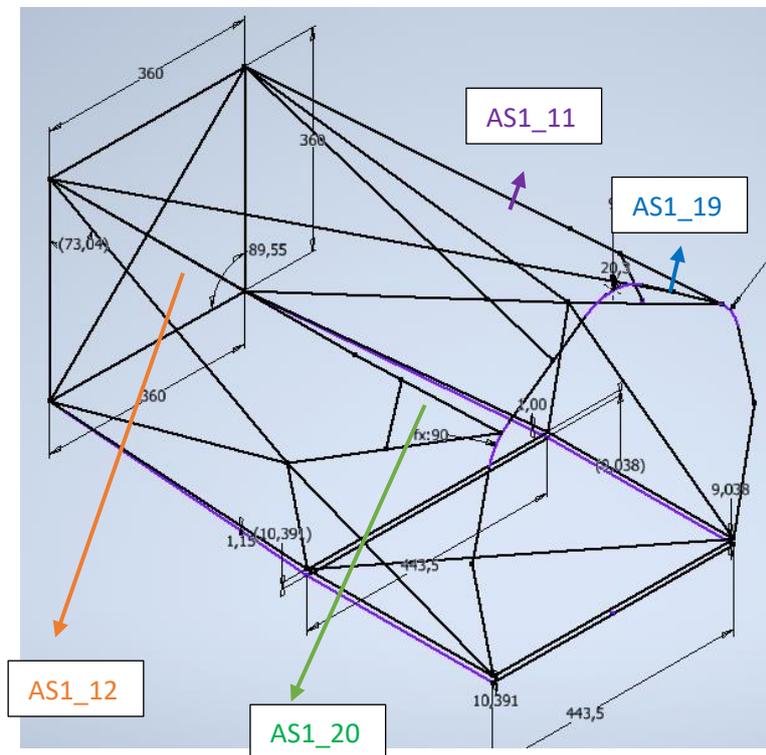
Componente tubular	Ángulo	Diferencia
AS1_11	2.1°	1.4°
AS1_19	3.5°	

Tabla 15. Diferencia entre AS1_11 y AS1_19.

Diferencia del ángulo.

Componente tubular	Ángulo	Diferencia
AS1_12	2.25°	1.375°
AS1_20	3.625°	

Figura 79. Sección 1 en software CAD.



Fuente: Autores.

Sin embargo, este defecto se reproduce en dos componentes, tales como AS1_21, AS1_24, AS1_26 Y AS1_22, AS1_23 y AS1_25.

Tabla 16. Diferencia entre ASI_21, ASI_24, ASI_26.

Diferencia del ángulo.

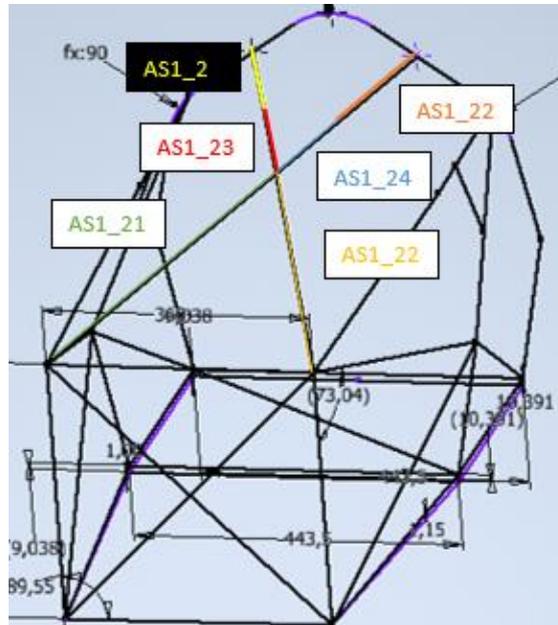
Componente tubular	Ángulo	Diferencia
ASI_21	8.5°	3°
ASI_24	5.5°	0.75°
ASI_26	6.25°	

Tabla 17. Diferencia entre ASI_22, ASI_23 y ASI_25.

Diferencia del ángulo.

Componente tubular	Ángulo	Diferencia
ASI_22	7°	0.7°
ASI_23	7.7°	0.775°
ASI_25	8.475°	

Figura 80. Defecto desde AS1_21 hasta AS1_26.



Fuente: Autores.

En la sección 2, se tiene un defecto en el ángulo de los componentes de tubulares que conforman las protecciones laterales, tanto de lado izquierdo y derecho. Este defecto en la inclinación de los tubos tiene una variación de aproximadamente 1°, además por el defecto de la sección 1 influye a la sección 2. En la tabla se especifica la diferencia de entre los ángulos de los componentes.

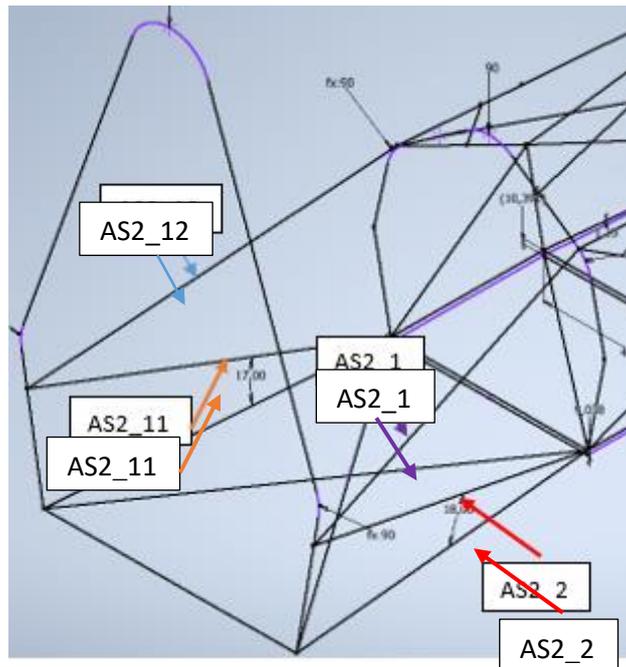
Tabla 18. Diferencia entre AS2_1, AS2_12, AS2_11 y AS2_12.

Diferencia del ángulo.

Componente tubular	Ángulo	Diferencia
AS2_1	12.15°	0.45°

AS2_12	12.6°	
AS2_11	17°	1°
AS2_12	18°	

Figura 81. Protecciones laterales.



Fuente: Autores.

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE METODOLOGÍA CAD-CAE.

6.1 Cálculo de cargas presentes en la estructura

El proceso de cálculo de las fuerzas que actúan sobre el Fórmula SAE requirió una preparación previa rigurosa, que incluyó la revisión detallada del reglamento de la competencia, el dimensionamiento del chasis con herramientas de medición precisas y el diseño de la estructura de fijación para los instrumentos de medición. Estas etapas iniciales fueron fundamentales para establecer una base técnica sólida. Posteriormente, se

realizará el análisis estructural del chasis del Fórmula Student EB17, considerando las principales cargas dinámicas y estáticas, como la transferencia de masa lateral, la transferencia de masa longitudinal y las fuerzas de frenado, datos esenciales para su posterior simulación mediante el método de elementos finitos.

6.1.2 Transferencia de masa lateral

La transferencia de masa lateral es un aspecto clave en la dinámica vehicular, especialmente en vehículos como el Fórmula Student (EB17). Este fenómeno ocurre cuando el peso del vehículo se redistribuye entre las ruedas al tomar una curva, afectando la tracción, la estabilidad y el comportamiento dinámico. Para el cálculo de la transferencia de masa lateral, es necesario determinar previamente la velocidad máxima al tomar una curva, la aceleración centrípeta con la finalidad de encontrar las fuerzas G que influyen en el vehículo. Una vez obtenidas estas variables, se utiliza una sumatoria de fuerzas y momentos en el eje y del chasis para calcular las fuerzas que representan la transferencia de masa lateral.

Para poder determinar a qué velocidad se debe tomar una curva con ese radio se emplea la siguiente formula (Gillespie,1992):

$$V_{max} = \sqrt{\mu * g * r}$$

En donde:

μ = Coeficiente de fricción de los neumáticos.

g= gravedad.

r= radio de la curva

Para calcular la velocidad máxima, se calcula con los siguientes datos y se visualiza la tabla con velocidad en m/s y en km/h:

Datos:

$$\mu = 1,1$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$r = 20\text{m.}$$

Tabla 19. Velocidad para tomar una curva.

VELOCIDAD PARA TOMAR UNA CURVA.	
VELOCIDAD PARA CURVA M/S	VELOCIDAD PARA CURVA KM/H
CALCULADA	CALCULADA
14,69	52,9

Sin embargo, al tratarse de una carrera automovilística, los límites de velocidad habituales no se consideran, ya que los valores dependen principalmente de la resistencia del vehículo y la habilidad del conductor al volante. Por este motivo, los valores de velocidad pueden incrementarse significativamente. En este contexto, la siguiente tabla ajusta los valores calculados de velocidad, tomando valores más elevados para simular de manera realista las condiciones de una competencia automovilística.

Tabla 20. Velocidad propuesta para tomar una curva.

VELOCIDAD PARA TOMAR UNA CURVA.	
VELOCIDAD PARA CURVA KM/H PROPUESTA	VELOCIDAD PARA CURVA M/S PROPUESTA
65	18,06

Según Córdova y Merchán, el cálculo se basa en la aceleración centrífuga, determinada de la siguiente manera:

$$Ac = \frac{v^2}{r}$$

Donde:

Ac= Aceleración centrífuga.

v= Velocidad del vehículo

r = Radio de la curva más cerrada.

Tabla 21. Aceleración centrífuga.

ACELERACION CENTRIFUGA	
ACELERACION CENTRIFUGA V. CALCULADA	12,21 m/s
ACELERACION CENTRIFUGA V. PROPUESTA	16,30 m/s

Luego, con la aceleración centrífuga obtenida lo que se determina son la fuerzas G que experimenta el monoplaza de competencia, su cálculo se fundamenta en la siguiente formula (Córdova y Merchán, 2020):

$$F_g = \frac{Ac}{g}$$

Con dichas formula lo único se procede a obtener la fuerza g tanto para la velocidad máxima calcula como para la velocidad que podrían alcanzar los vehículos de Fórmula Sae en una competencia.

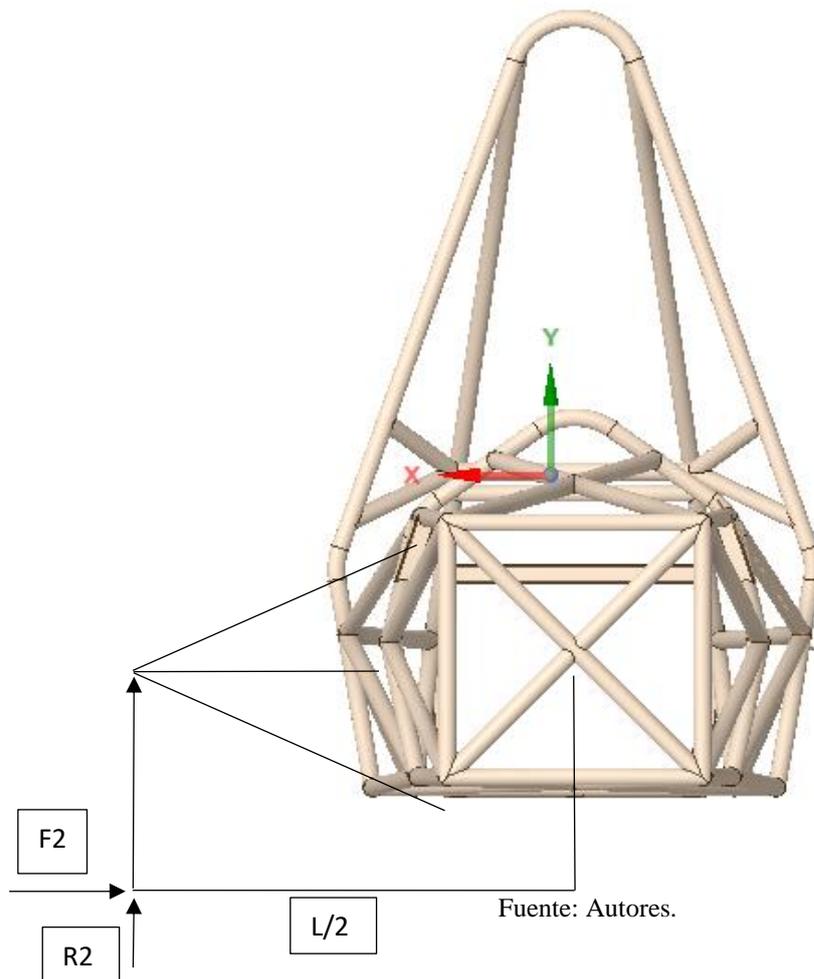
Tabla 22. Fuerzas G calculada y propuesta.

FUERZAS G CALCULADA
1,7

FUERZA G PROPUESTA
2,2

Obtenido la fuerza G, ahora se procede a establecer la reacción en las llantas mediante una sumatoria de fuerzas en el eje y, sumatoria de momentos. Encontrando la transferencia de masa lateral.

Figura 82. Transferencia de masa lateral.



Para calcular la transferencia de masa lateral se emplea:

$$\sum Fy = W$$

$$R1 + R2 = W$$

$$R2 = -R1 + W$$

$$\sum M2 = 0$$

$$-R1 * L + Ac * h - W * L1 = 0$$

$$-R1 * L + (W * Fg) * h - W * L1 = 0$$

Despejando R1, se obtiene:

$$-R1 = \frac{(W * L1) - (Ac * h)}{L}$$

$$R1 = \frac{-(W * L1) + (Ac * h)}{L}$$

Se reemplaza R1, en la ecuación en la ecuación 1.1:

$$R2 = -R1 + W$$

$$R2 = \frac{(Ac * h) - (W * L1)}{L} + W$$

Los datos necesarios para el cálculo son: peso (W), aceleración centrífuga (ac), altura (h), ancho de vía delantero (L), gravedad (g), distancia desde Cg a una rueda (L1).

Tabla 23. Datos para el cálculo de transferencia de masa lateral.

DATOS	
Fg	2,2
L	1,2
L1	0,6
g	9,81
h	0,33

Con la fórmula para encontrar las reacciones presentes en las estructuras, se toma un peso inicial de 337 kg a los cuales se añaden pesos referentes a motores. A continuación, se especifica dichos pesos.

Tabla 24. Masa de motores y peso total.

PESO		
MOTOR	Masa (kg)	W
1 (YASA 750)	37	3671,883
2 (MOTOREN DT10-220)	55	3848,463
3(MOTOREN DT10-320-20)	75	4044,663
4 (MOTOREN DT13-360)	88	4172,193

Los resultados obtenidos serán empleados en la simulación, específicamente la R_2 es la que se emplea en la simulación de rigidez torsional según el peso del motor.

Tabla 25. Cálculo de R_1 y R_2 .

CALCULO DE TRASNFERENCIA DE MASA LATERAL		
MOTOR	R1	R2
1	180,16	3423,05
2	188,99	3590,80
3	198,80	3777,19
4	205,18	3898,35

6.1.3 Transferencia de masa longitudinal y frenado.

La transferencia de masa longitudinal es un fenómeno esencial en la dinámica vehicular que ocurre cuando un vehículo acelera o desacelera. Durante el frenado, el peso del vehículo se redistribuye hacia las ruedas delanteras debido a la inercia, lo que afecta la tracción y la estabilidad. Factores como la altura del centro de gravedad, la distancia entre

ejes y la rigidez de la suspensión determinan el comportamiento del vehículo durante esta transferencia (Cuenca y Jara, 2022).

$$\sum Fy = 0$$

$$R_2 + R_1 - W = 0$$

$$\sum Fx = m * a$$

$$-f_2 - f_1 = m * a$$

$$-0,83R_2 - 0,83R_1 = m * a$$

Ahora, se debe encontrar la aceleración de frenado obteniendo:

Donde:

$V_0 = 100 \text{ km/h}$ o $27,7 \text{ m/s}$

$V = 0$

$T = 3\text{s}$

$$a \int_0^t dt = \int_0^t dv$$

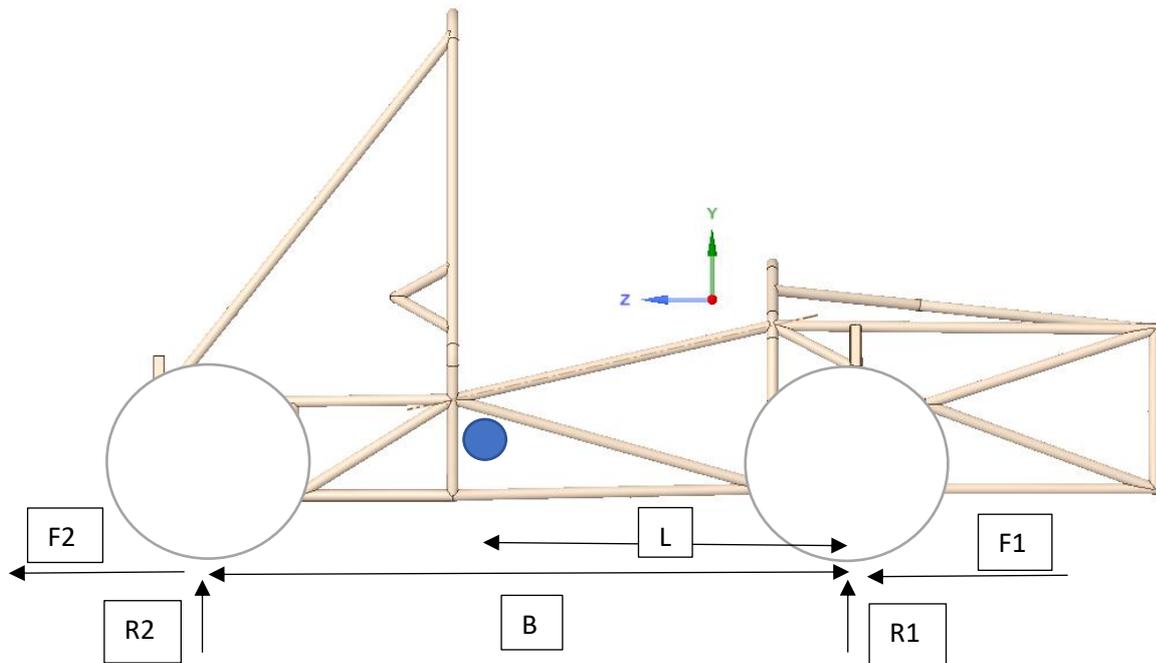
$$a * (3 - 0) = -V$$

$$a * 3\text{s} = -V$$

$$a = -\frac{27,7}{3}$$

$$a = -9,233$$

Figura 83. *Transferencia de masa longitudinal.*



Fuente: Autores.

Ahora, teniendo la aceleración por la frenada se reemplaza en la ecuación.

$$-0,83R_2 - 0,83R_1 = m * a$$

$$\sum M_G = 0$$

$$0,72R_1 - 0,48 R_2 - 0,33f_2 - 0,33f_1 = 0$$

$$0,72R_1 - 0,48 R_2 - 0,33 * 0,83R_2 - 0,33 * 0,83R_1 = 0$$

$$0,43R_1 - 0,77 R_2 = 0$$

$$R_1 = \frac{0,77 * R_2}{0,43}$$

$$R_1 = 1,7918 * R_2$$

Se reemplaza en la ecuación y se obtiene:

$$-0,83R_2 - 0,83 * (1,7918 * R_2) = m * a$$

$$-0,83R_2 - 1,487R_2 = m * a$$

$$-R_2(0,83 + 1,487) = m * a$$

$$-R_2 = \frac{m * a}{2,317}$$

Con R_2 obtenido, se reemplaza en la ecuación de la siguiente manera:

$$R_1 = 1,7918 * R_2$$

$$F_1 = 0,83 * R_1$$

$$F_2 = 0,83 * R_2$$

Para el análisis mediante elementos finitos, se utilizan las cargas R_1 y F_1 , en las pruebas de rigidez longitudinal y frenado respectivamente.

Tomando las cargas con respecto a los cálculos anteriormente empleados, se toma una masa de 350 kg con el motor axial de 12,3 kg, tomando un peso base de 337kg a los cuales se sumarán pesos referentes a motores que superan el peso del motor antes utilizado.

Tabla 26. Cálculo R_1 , R_2 , F_1 y F_2 .

Transferencia de masa longitudinal y frenado				
Motor	R1	R2	F1	F2
1	2670,4	1490,4	2216,4	1237,0
2	2798,9	1562,1	2323,1	1296,5
3	2941,7	1641,8	2441,6	1362,7
4	3034,6	1693,6	2518,7	1405,7

Para el análisis por elementos finitos se utiliza R_1 y F_1 en las pruebas tanto para rigidez longitudinal y frenado.

6.2 Análisis elementos finitos.

Para el análisis estructural del chasis se emplea la Ingeniería Asistida por Computador (CAE), utilizando metodologías como elementos esbeltos (1D), de superficie (2D) y volumétricos (3D). En el caso de un chasis tubular, los elementos esbeltos tipo “Beam” y los de superficie tipo “Shell” destacan por su balance entre gasto computacional y tiempo de simulación. Los elementos “Beam” son ideales por su eficiencia y rapidez para analizar el comportamiento global del chasis, aunque tienen menor detalle en zonas complejas. Por otro lado, los elementos “Shell” ofrecen un análisis detallado en regiones críticas, pero a un costo computacional más alto.

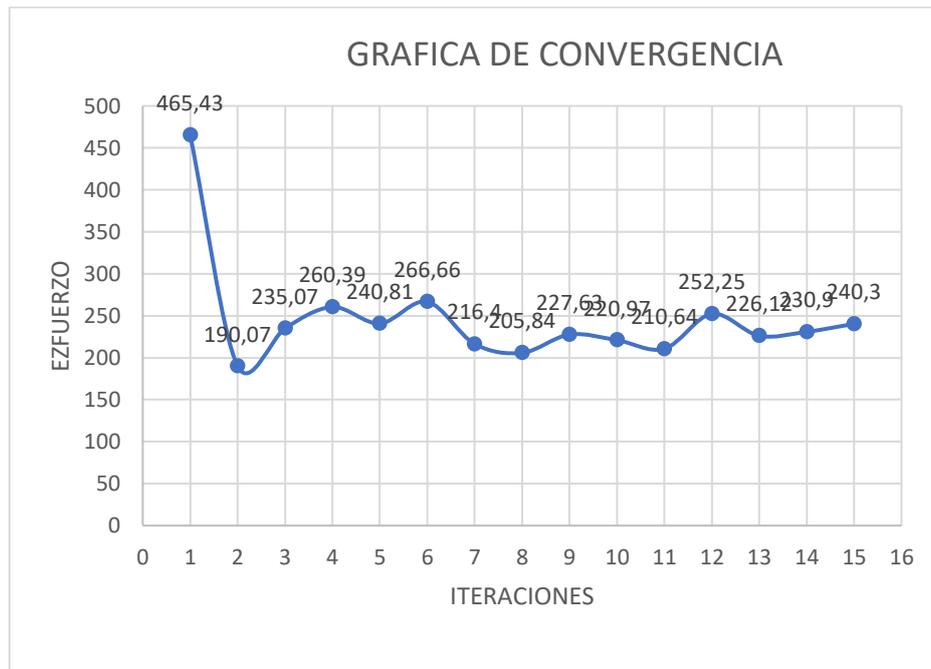
6.2.1 Convergencia de malla.

Para garantizar que los resultados no se vean afectados por la calidad de la malla, se emplean la convergencia de malla, un factor fundamental en la simulación por elementos finitos. Este procedimiento garantiza que los resultados no dependan del tamaño o distribución de la malla. La convergencia se evalúa mediante análisis con mallas de diferentes tamaños para comparar desplazamientos, tensiones o deformaciones. Al refinar la malla, los resultados deberían estabilizarse, indicando una precisión adecuada sin incrementar excesivamente el tiempo de cálculo. Este proceso permite obtener resultados representativos, minimizar errores numéricos y garantizar la fiabilidad del análisis. En la tabla se expone la convergencia de las mallas empleadas en la simulación por elementos finitos.

Tabla 27. Convergencia de malla.

N° NODOS	N° ELEMENTOS	CALIDAD DE MALLA	ITERACION	ESFUERZO (MPA)	TASA DE CONVERGENCIA (%)
17659	3443	0,92	1	316,5	NO APLICA
19659	38422	0,935	2	329,04	3,96%
22566	44193	0,94	3	545,8	65,88%
26137	51274	0,946	4	905,18	65,84%
39407	395960	0,9037	5	411,84	-54,50%
72778	143886	0,971	6	472,61	14,76%
100392	198833	0,9718	7	499,14	5,61%
139102	275881	0,978	8	429,83	-14%
217236	431412	0,984	9	530,66	23%
216580	430248	0,984	10	472,5	-10,96%
100392	198833	0,971	11	499,14	5,64%
83479	165173	0,973	12	471,07	-6%
72778	143886	0,97166	13	472,61	0%

Figura 84. Gráfica de convergencia del mallado.



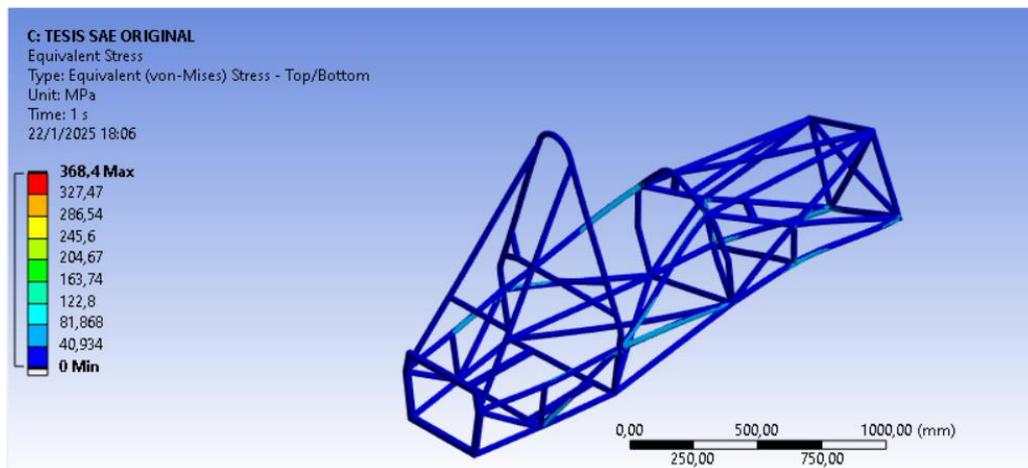
6.2.2 Análisis preliminar por elementos finitos estructura original.

Análisis de rigidez torsional.

En el análisis estructural del chasis tubular, se aplicaron fuerzas con magnitudes de 3423.05 N, 3590.80 N, 3777.19 N y 3898.35 N en los puntos de anclaje de la suspensión delantera, mientras que las restricciones se establecieron en los puntos de anclaje de la suspensión trasera, garantizando una distribución adecuada de las cargas para el estudio.

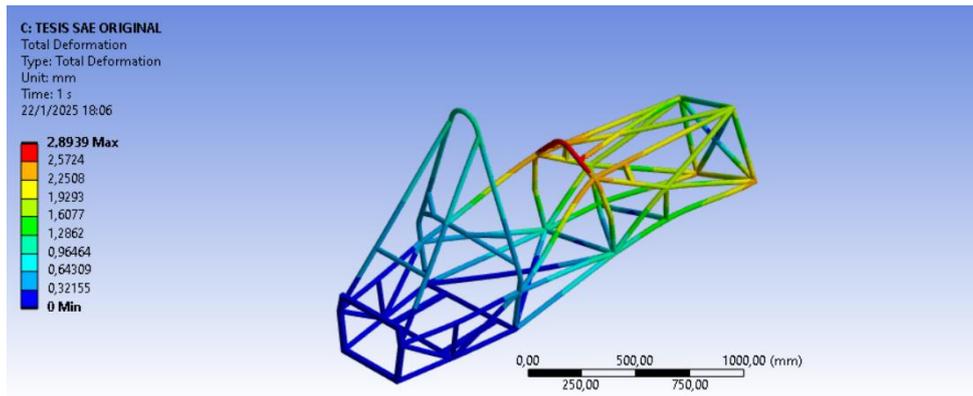
En el análisis estructural, con una fuerza aplicada de 3423.05 N, el esfuerzo equivalente máximo alcanzado fue de 368.4 MPa, concentrado en los puntos más críticos y representado por la coloración roja en la primera imagen, manteniéndose dentro del límite elástico del material de 435 MPa. La deformación máxima registrada en el chasis fue de 2.8939 mm, como se muestra en la segunda imagen. Por último, el coeficiente de seguridad presentó un valor mínimo de 1.1808, como se observa en la tercera imagen, garantizando que el diseño es seguro bajo las condiciones de carga aplicadas.

Figura 85. Esfuerzos equivalentes del chasis original primera simulación.



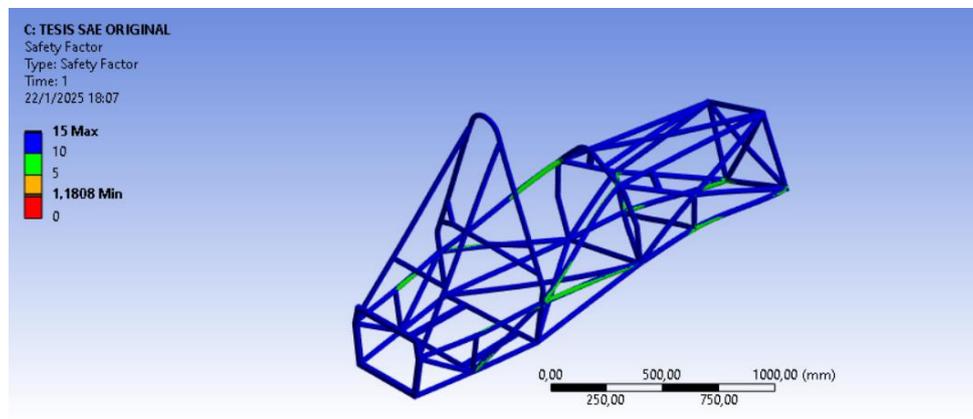
Fuente: Autores.

Figura 86. Deformación del chasis original de la primera simulación.



Fuente: Autores.

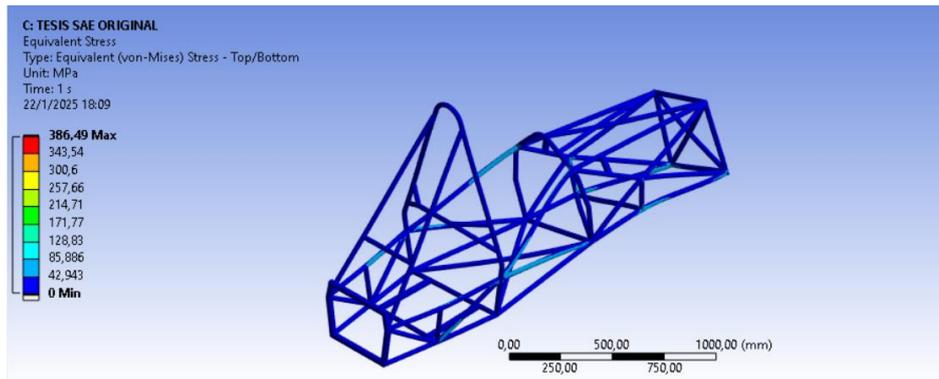
Figura 87. Coeficiente de seguridad del chasis original de la primera simulación.



Fuente: Autores.

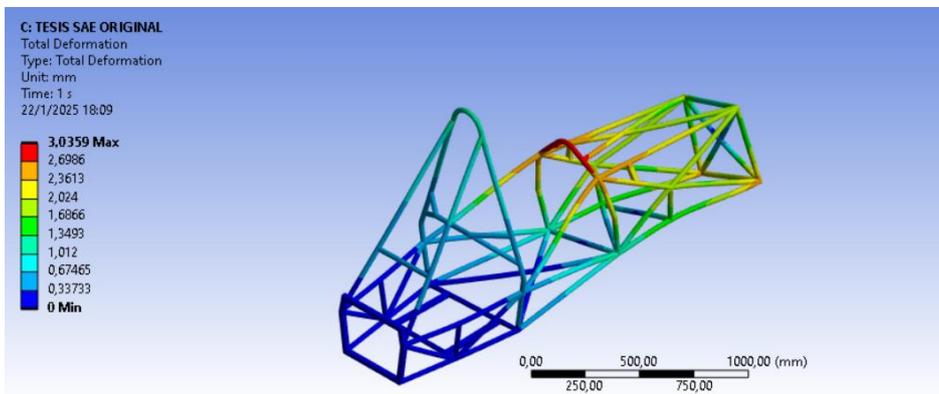
En el segundo análisis, aplicando una fuerza de 3590.80 N en los puntos de anclaje de la suspensión delantera, se obtuvo un esfuerzo máximo de 386.49 MPa y una deformación de 3.0359 mm. El coeficiente de seguridad mínimo fue de 1.1255, asegurando la resistencia del diseño bajo las condiciones evaluadas.

Figura 88. Esfuerzos equivalentes del chasis original del segundo análisis.



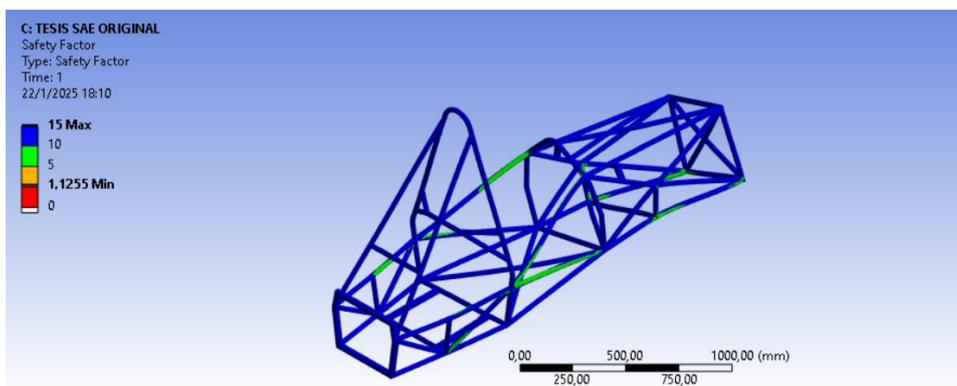
Fuente: Autores.

Figura 89. Deformación del chasis original del segundo análisis.



Fuente: Autores.

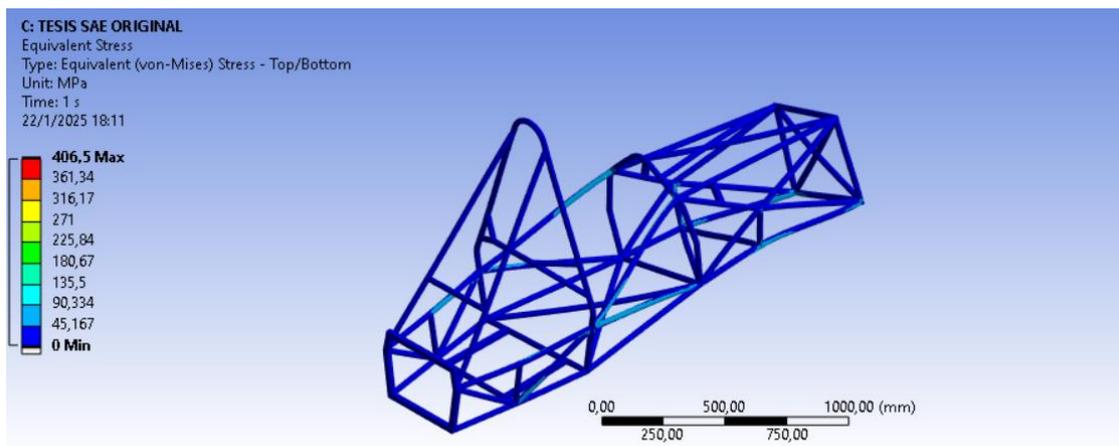
Figura 90. Coeficiente de seguridad del chasis original del segundo análisis.



Fuente: Autores.

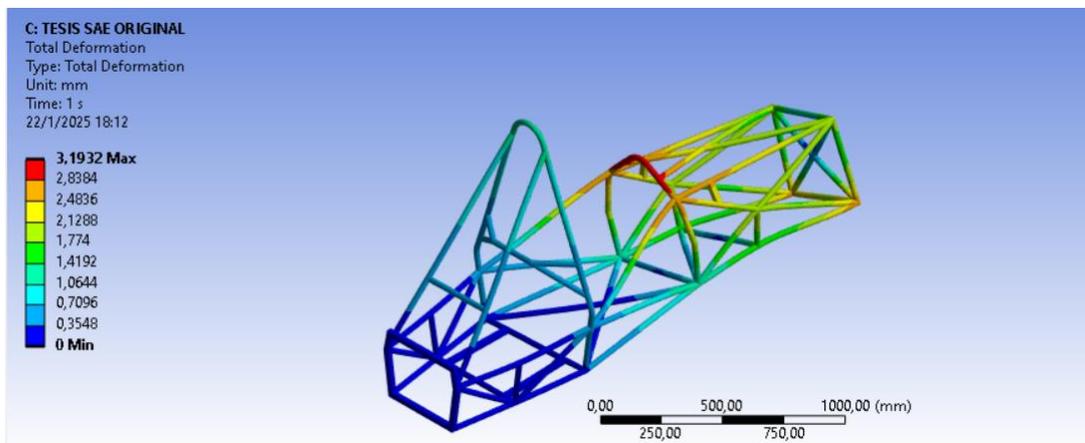
En el tercer análisis, con una fuerza de 3777.19 N aplicada en los anclajes de la suspensión delantera, se registró un esfuerzo máximo de 406.5 MPa y una deformación de 3.1932 mm. El coeficiente de seguridad mínimo fue de 1.0701, confirmando que el diseño soporta de manera segura las condiciones de carga aplicadas.

Figura 91. Esfuerzos equivalentes del chasis original del tercer análisis.



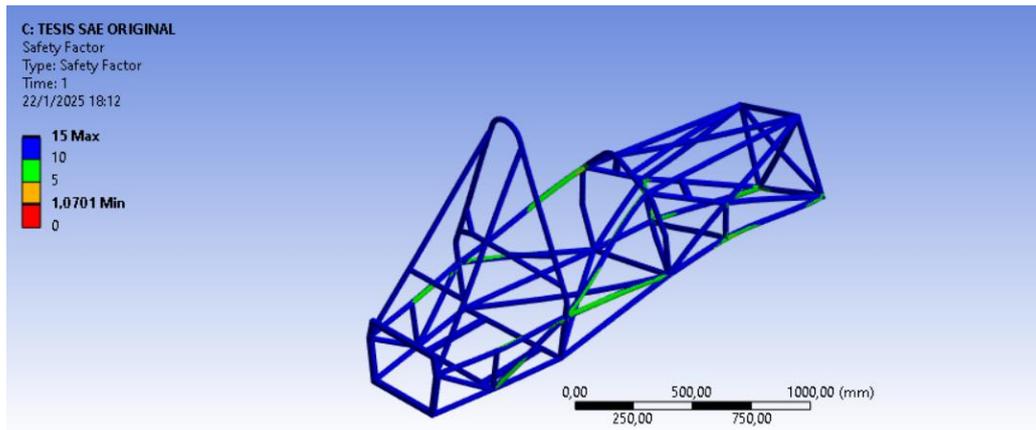
Fuente: Autores.

Figura 92. Deformación del chasis original del tercer análisis



Fuente: Autores.

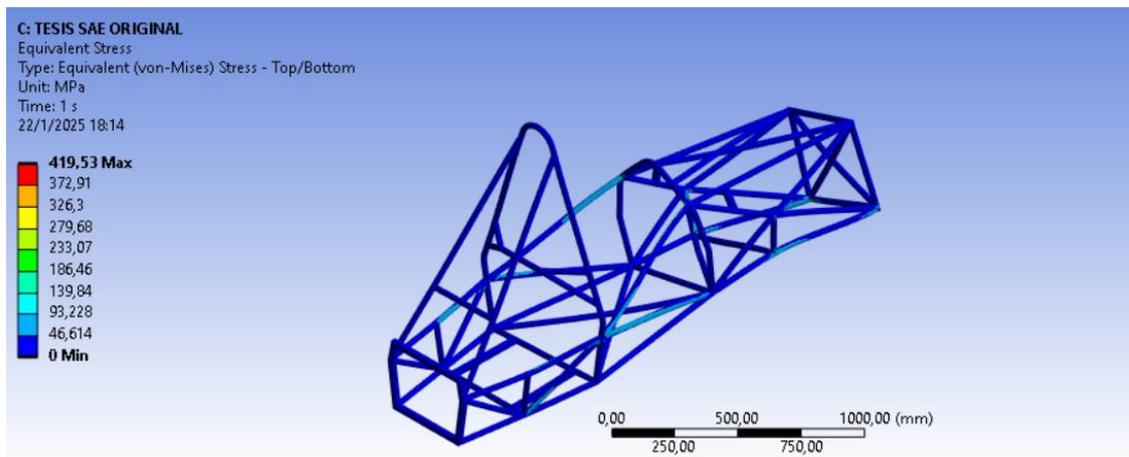
Figura 93. Coeficiente de seguridad del chasis original del tercer análisis.



Fuente: Autores.

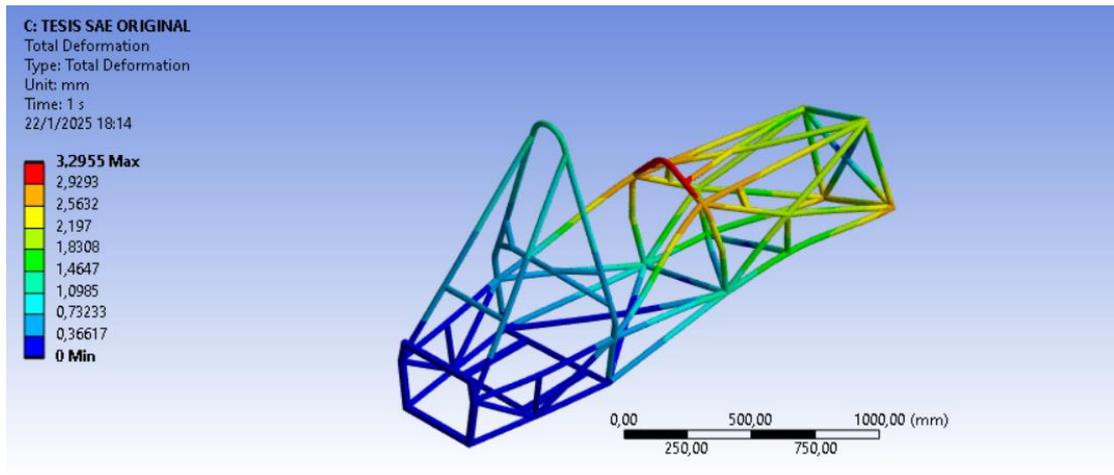
En el cuarto análisis, con una fuerza de 3898 N aplicada en los anclajes de la suspensión delantera, se obtuvo un esfuerzo máximo de 419.53 MPa, una deformación de 3.2955 mm y un coeficiente de seguridad mínimo de 1.0369, confirmando la resistencia del diseño.

Figura 94. Esfuerzos equivalentes del chasis original del cuarto análisis.



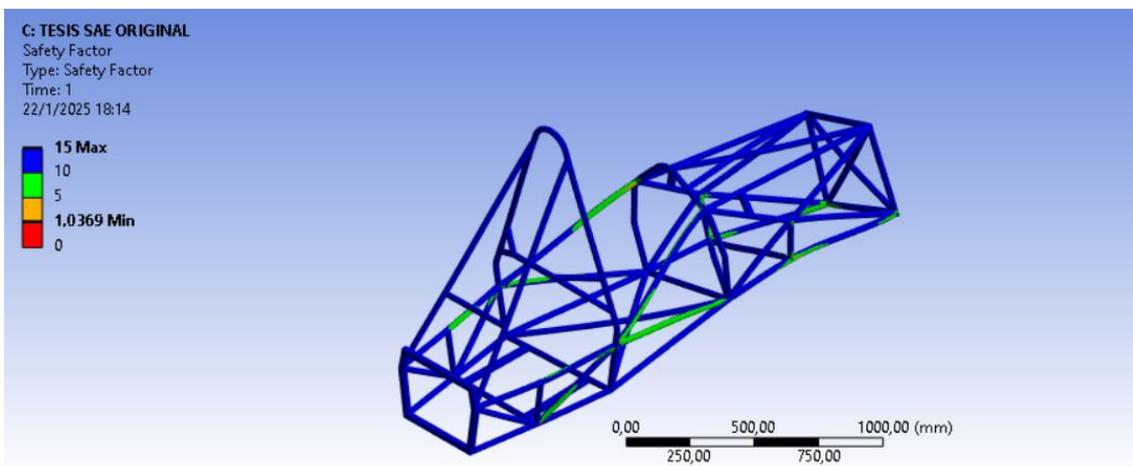
Fuente: Autores.

Figura 95. Deformación del chasis original del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

Figura 96. Coeficiente de seguridad del chasis original del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

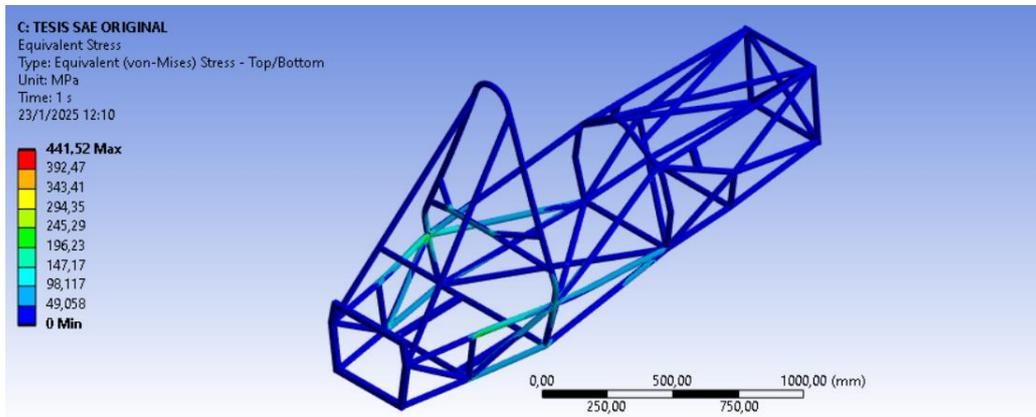
Análisis de rigidez longitudinal.

Para analizar la rigidez longitudinal, las fuerzas generadas por la desaceleración se aplican en los puntos de anclaje de las suspensiones delantera y trasera del chasis. Estas cargas verticales se distribuyen estratégicamente para simular las condiciones reales de frenada. Los resultados obtenidos permiten identificar el esfuerzo total soportado por la estructura

y la deformación máxima experimentada, evaluando su influencia en la estabilidad y desempeño estructural del vehículo.

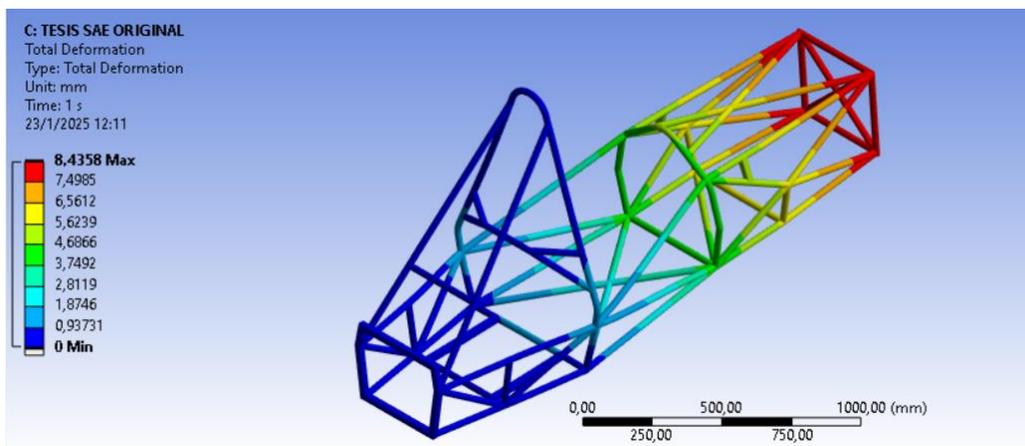
El primer análisis de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 2798.9 N, mostró un desplazamiento máximo de 8.435 mm y deformaciones mínimas en otras áreas. El esfuerzo equivalente alcanzó un máximo de 441.52 MPa, mientras que el coeficiente de seguridad más bajo fue de 0.834, indicando que la estructura soporta las cargas con un margen adecuado.

Figura 97. Esfuerzos equivalentes del chasis original de la primera simulación.



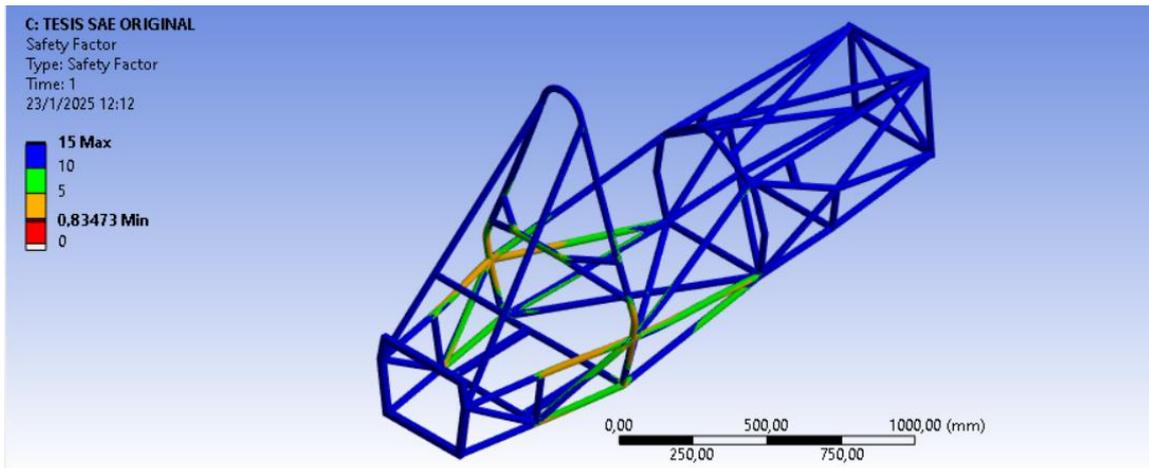
Fuente: Autores.

Figura 98. Deformación del chasis original de la primera simulación.



Fuente: Autores.

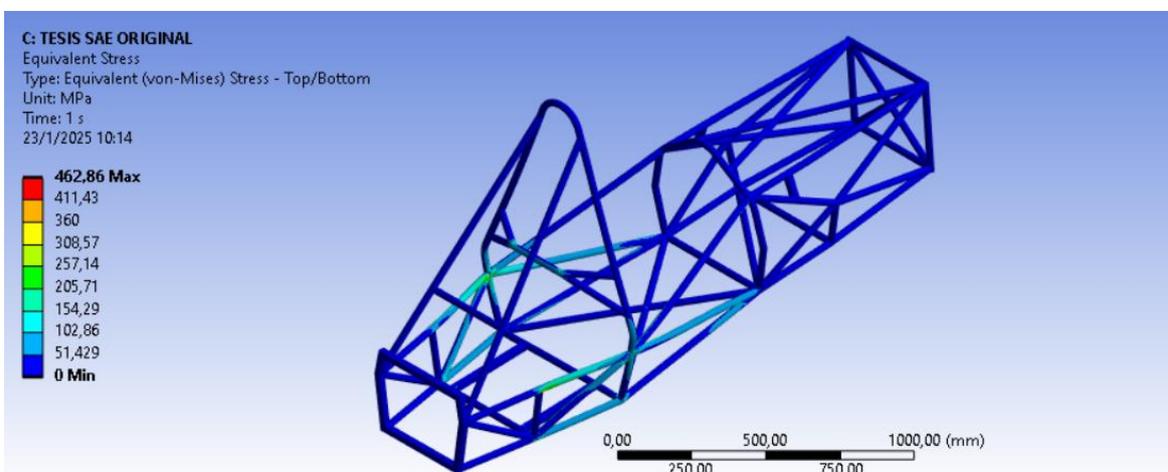
Figura 99. Coeficiente de seguridad del chasis original de la primera simulación.



Fuente: Autores.

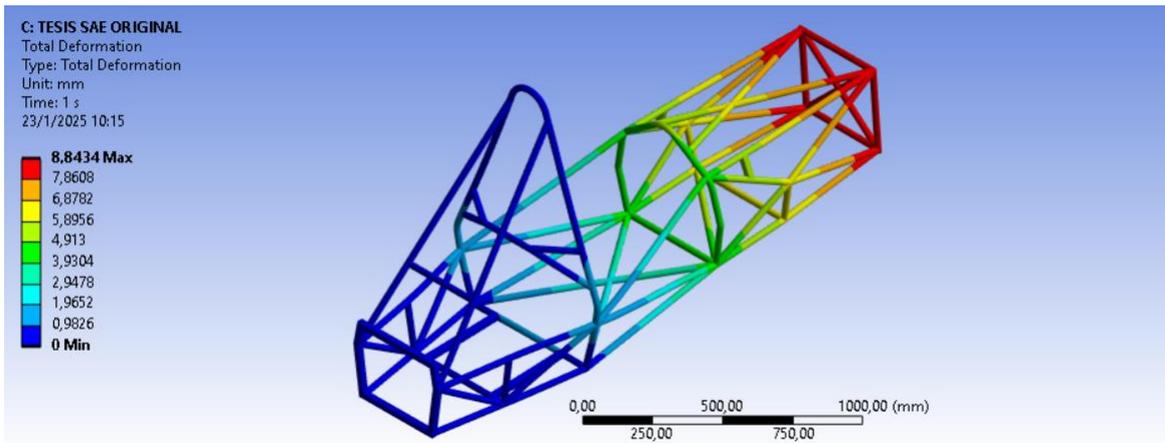
El segundo análisis de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 2670.4 N, mostró un desplazamiento máximo de 8.843 mm y deformaciones mínimas en otras áreas. El esfuerzo equivalente alcanzó un máximo de 462.86 MPa, mientras que el coeficiente de seguridad más bajo fue de 0.796, indicando que la estructura soporta las cargas con un margen adecuado.

Figura 100. Esfuerzos equivalentes del chasis original del segundo análisis.



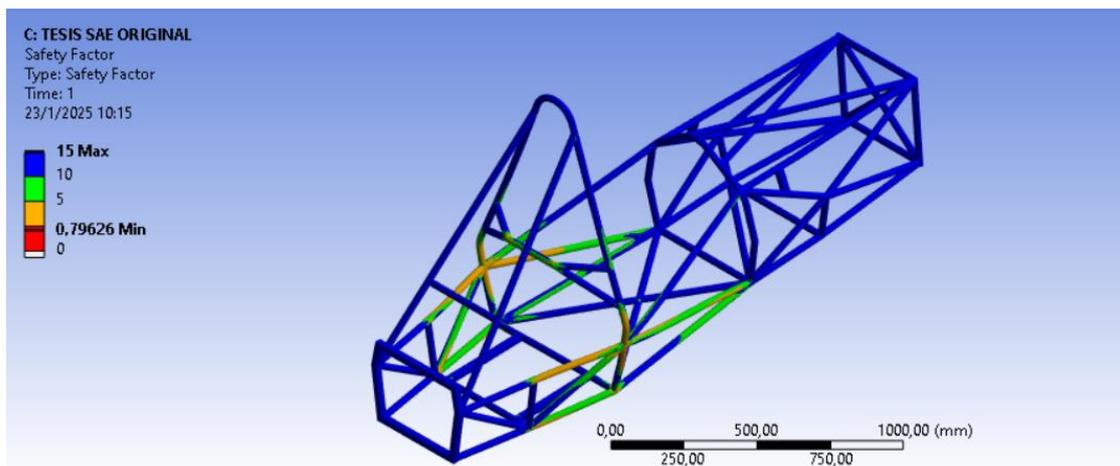
Fuente: Autores.

Figura 101. Deformación del chasis original del segundo análisis.



Fuente: Autores.

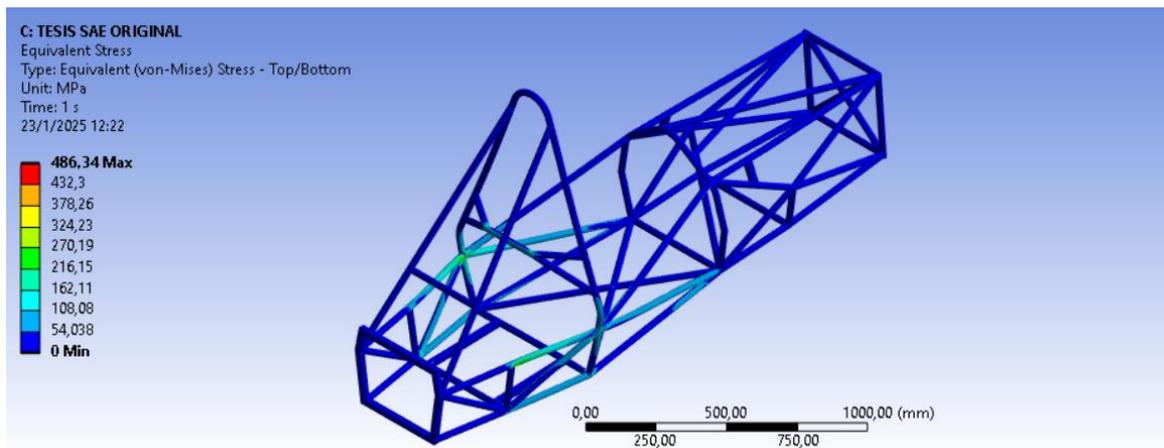
Figura 102. Coeficiente del chasis original del segundo análisis.



Fuente: Autores.

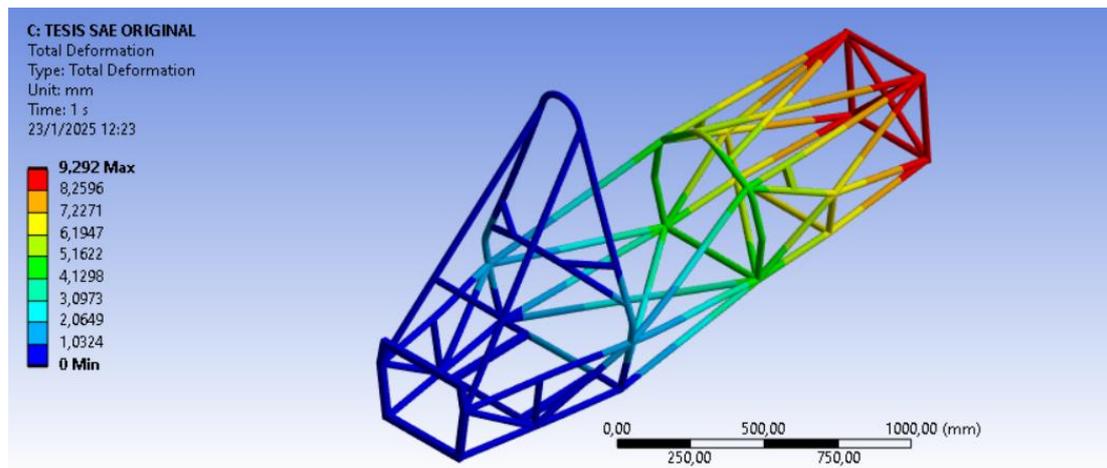
El tercer análisis de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 2941.7 N, mostró un desplazamiento máximo de 9,292 mm y deformaciones mínimas en otras áreas. El esfuerzo equivalente alcanzó un máximo de 441.52 MPa, mientras que el coeficiente de seguridad más bajo fue de 0.757, indicando que la estructura soporta las cargas con un margen adecuado.

Figura 103. Esfuerzos equivalentes del chasis original del tercer análisis.



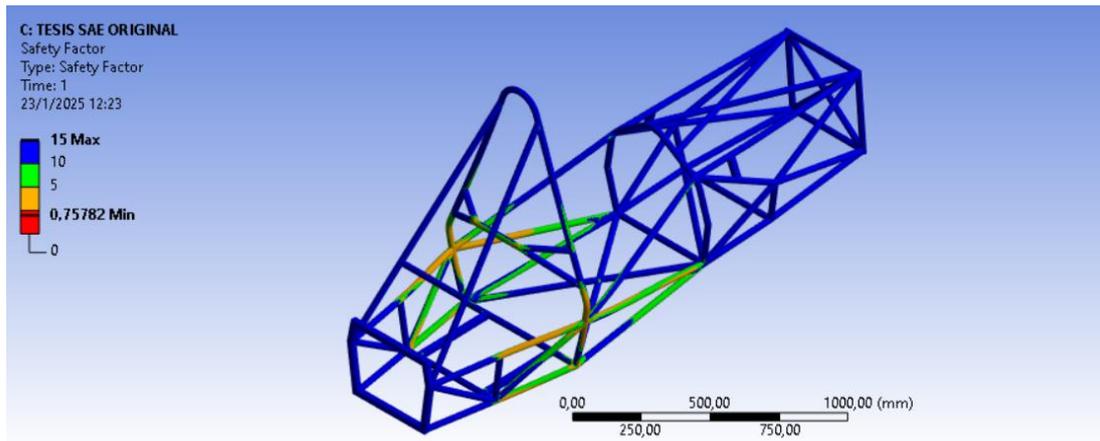
Fuente: Autores.

Figura 104. Deformación del chasis original del tercer análisis.



Fuente: Autores.

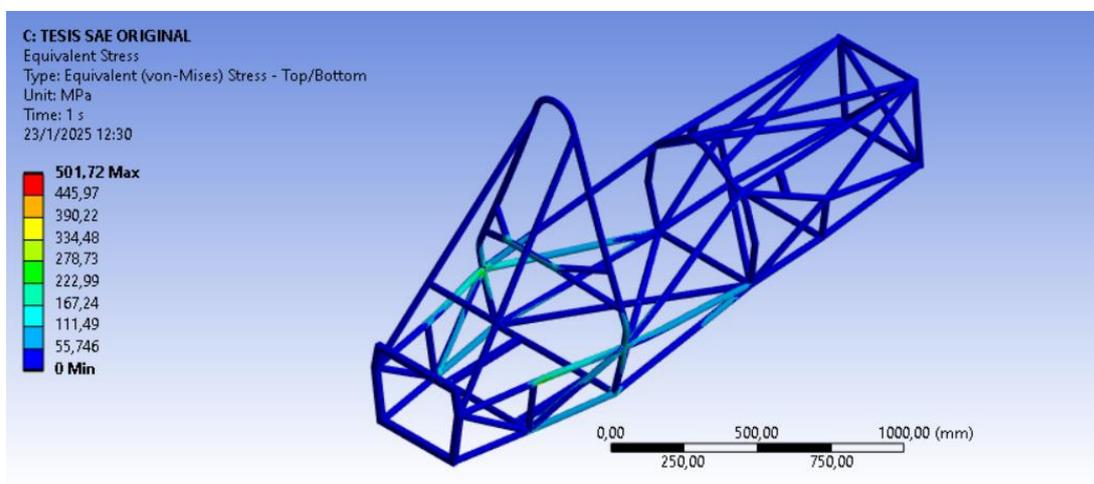
Figura 105. Coeficiente de seguridad del chasis original del tercer análisis.



Fuente: Autores.

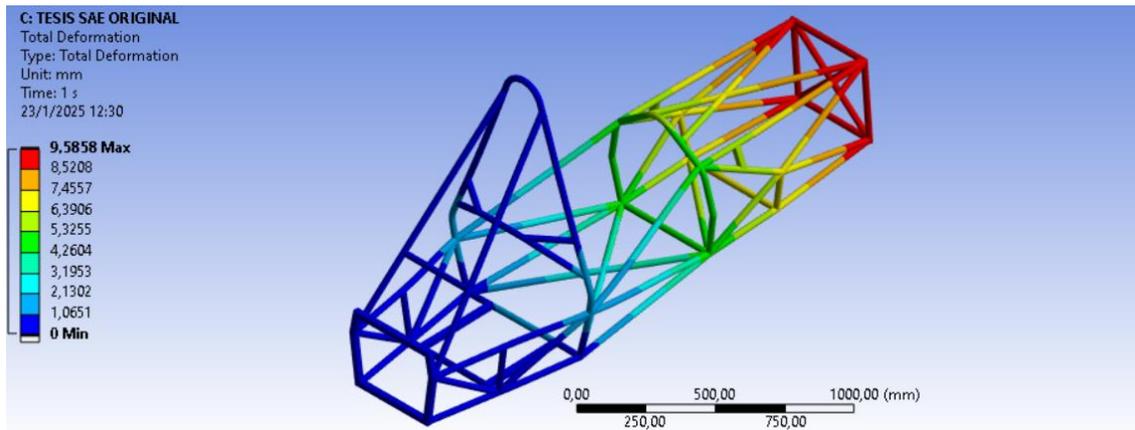
El cuarto análisis de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 3034.6 N, mostró un desplazamiento máximo de 9,585 mm y deformaciones mínimas en otras áreas. El esfuerzo equivalente alcanzó un máximo de 501,72 MPa, mientras que el coeficiente de seguridad más bajo fue de 0.734, indicando que la estructura soporta las cargas con un margen adecuado.

Figura 106. Esfuerzos equivalentes del chasis original del cuarto análisis.



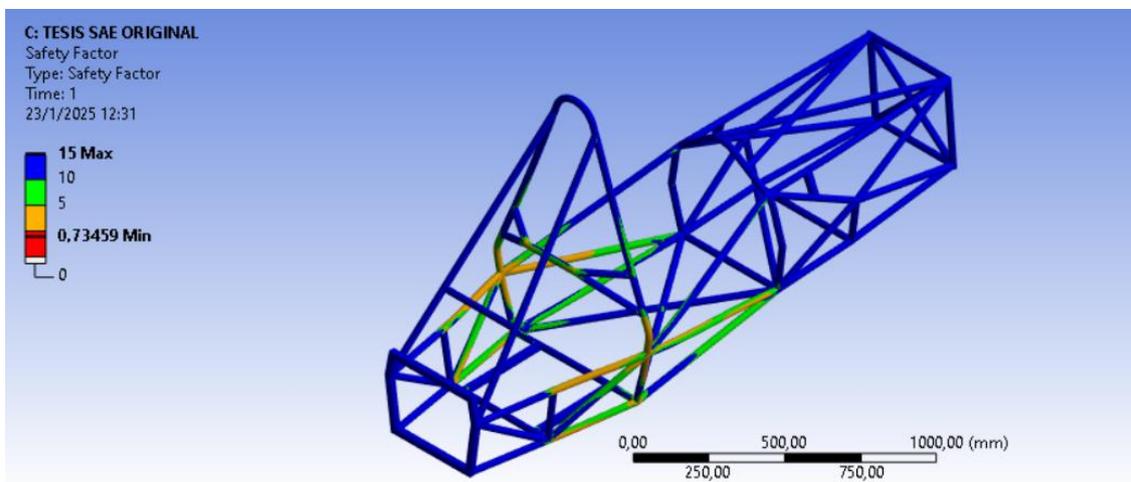
Fuente: Autores.

Figura 107. Deformación del chasis original del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

Figura 108. Coeficiente de seguridad del chasis original del cuarto análisis.



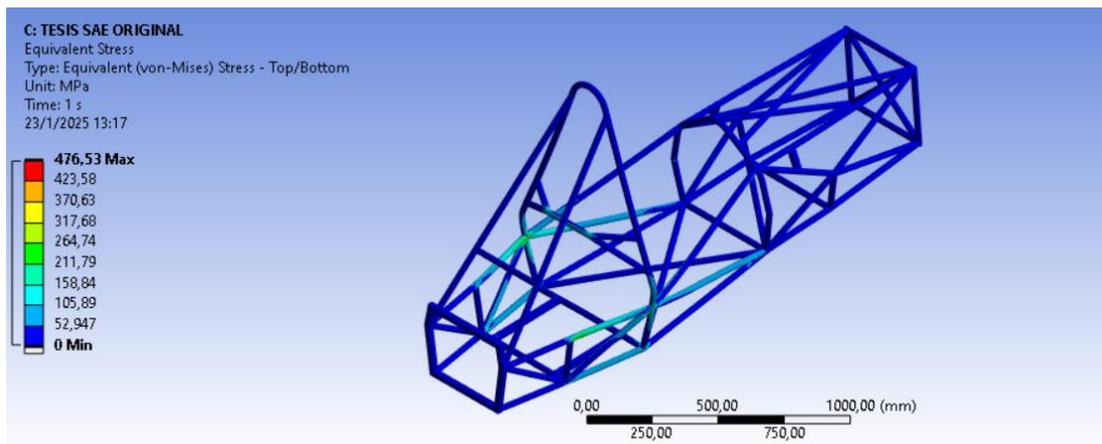
Fuente: Autores.

Análisis del frenado.

En el análisis de frenado, se consideran las fuerzas longitudinales que actúan sobre el vehículo. Las cargas aplicadas, junto con las restricciones estructurales, se distribuyen en los puntos de anclaje de las suspensiones delantera y trasera. Estas fuerzas tienen un valor de 2670 N, 2789 N, 2941 N, 3034 N en sentido vertical y 2216 N, 2323 N, 2441 N y 2518 N en sentido horizontal.

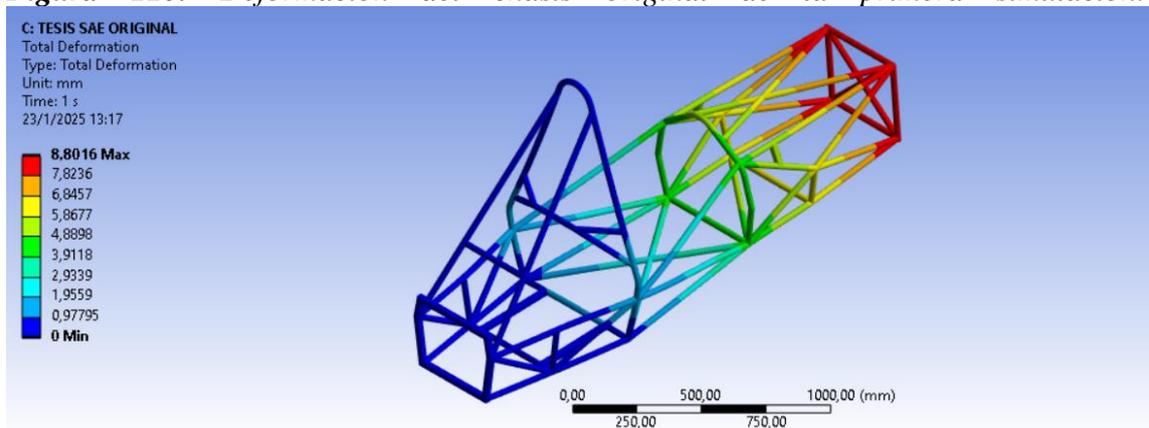
El primer análisis del frenado empleando una fuerza en los soportes de la suspensión delantera de 2670.4 N y 2216.4 N, mostró un esfuerzo máximo de 476.53 MPa y un desplazamiento máximo de 8.80 mm en las zonas críticas, con deformaciones insignificantes en otras áreas. El coeficiente de seguridad mínimo de 0.790 asegura que las cargas aplicadas son soportadas con un margen adecuado.

Figura 109. Esfuerzos equivalentes del chasis original de la primera simulación.



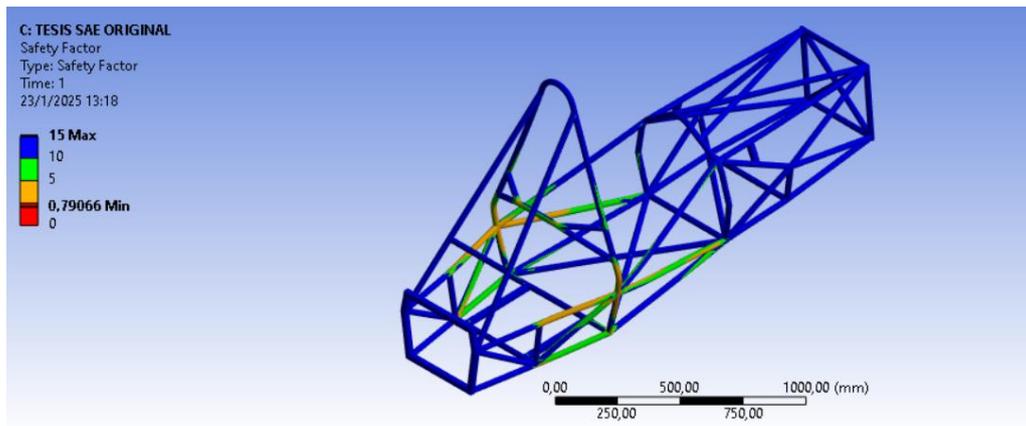
Fuente: Autores.

Figura 110. Deformación del chasis original de la primera simulación.



Fuente: Autores.

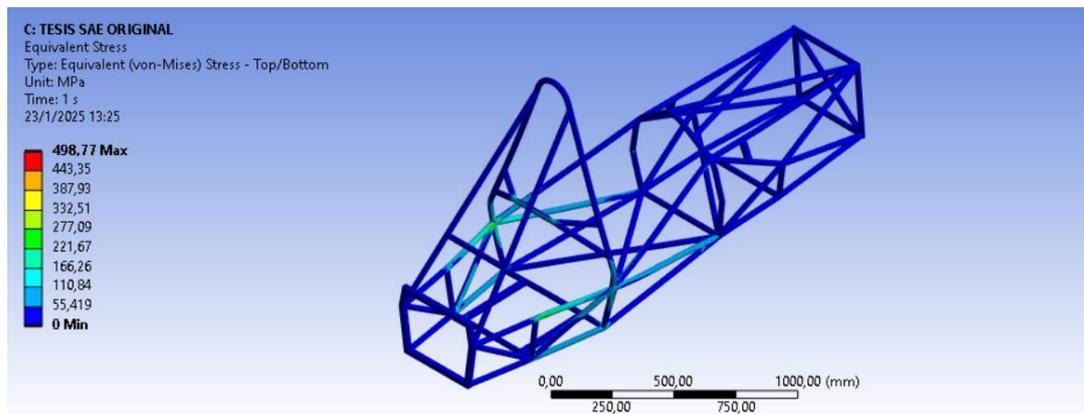
Figura 111. Coeficiente de seguridad del chasis original de la primera simulación.



Fuente: Autores.

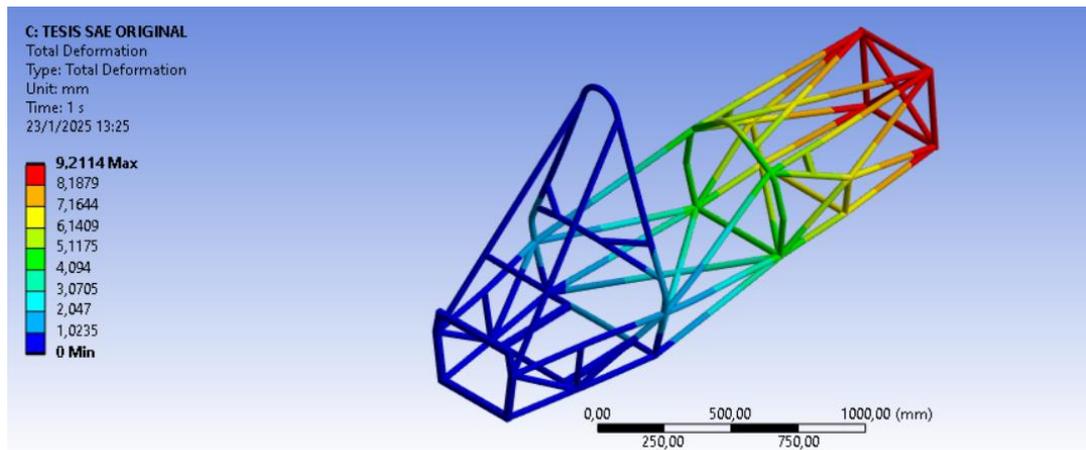
La segunda evaluación de la estructura, empleando una fuerza en los soportes de la suspensión delantera de 2798.9 N y 2323.1 N mostró un desplazamiento máximo de 9.21 mm en las zonas más críticas, mientras que en otras áreas las deformaciones fueron mínimas. El esfuerzo equivalente alcanzó un valor máximo de 498.77 MPa. Además, el coeficiente de seguridad presentó un valor mínimo de 0.755 en las áreas más vulnerables.

Figura 112. Esfuerzos equivalentes del chasis original del segundo análisis.



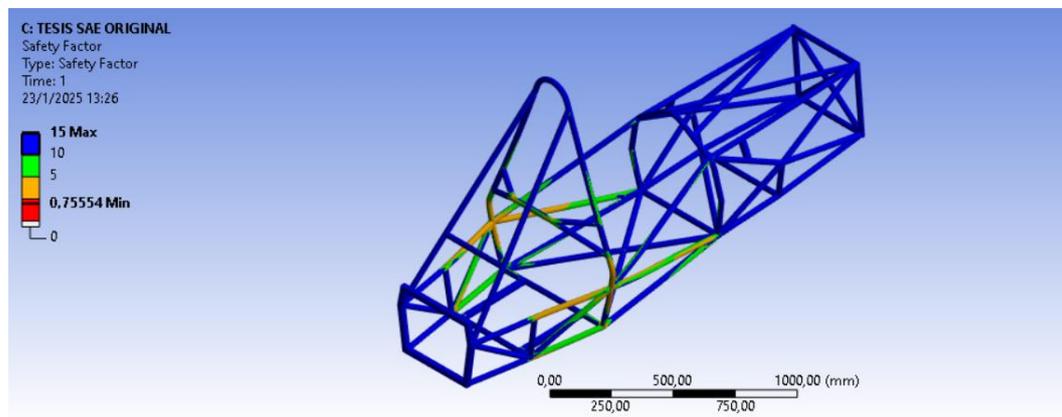
Fuente: Autores.

Figura 113. Deformación del chasis original del segundo análisis.



Fuente: Autores.

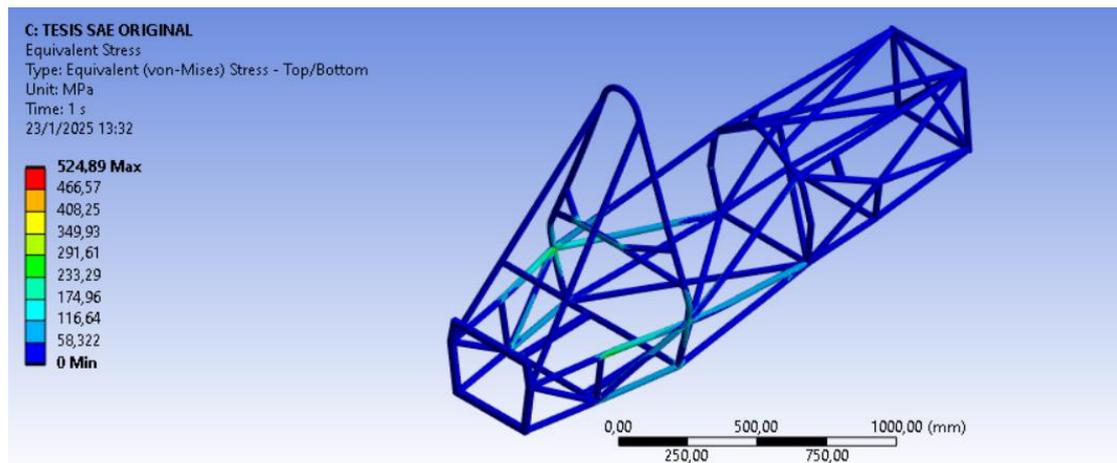
Figura 114. Coeficiente del chasis original del segundo análisis.



Fuente: Autores.

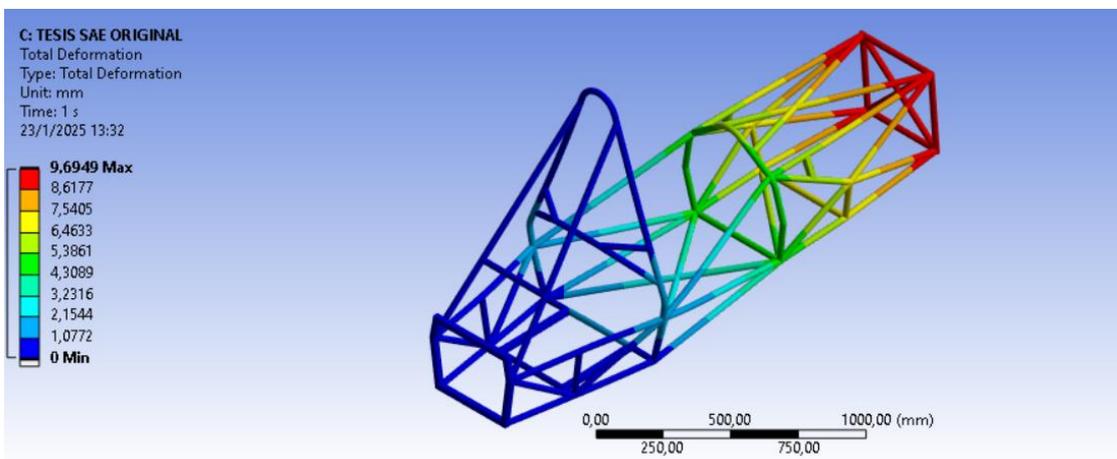
La tercera evaluación de la estructura, empleando una fuerza en los soportes de la suspensión delantera de 2941.7 N y 2441.6 N mostró un desplazamiento máximo de 9.96 mm en las zonas más críticas, mientras que en otras áreas las deformaciones fueron mínimas. El esfuerzo equivalente alcanzó un valor máximo de 524.89 MPa. Además, el coeficiente de seguridad presentó un valor mínimo de 0.717.

Figura 115. Esfuerzos equivalentes del chasis original del tercer análisis.



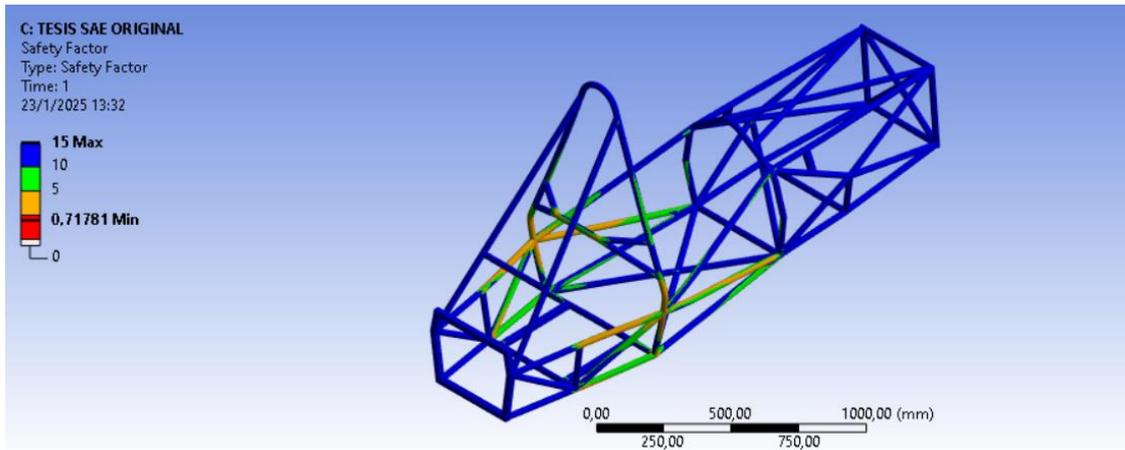
Fuente: Autores.

Figura 116. Deformación del chasis original del tercer análisis.



Fuente: Autores.

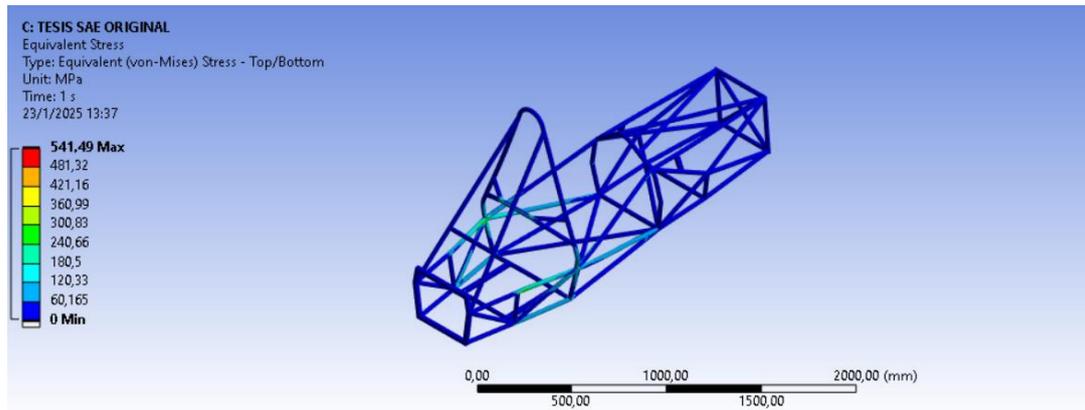
Figura 117. Coeficiente de seguridad del chasis original del tercer análisis.



Fuente: Autores.

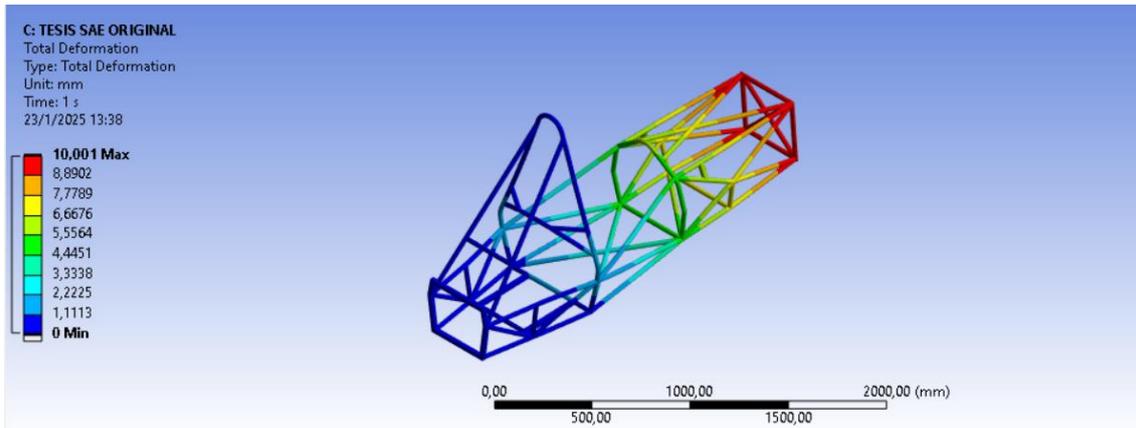
La cuarta evaluación de la estructura, empleando una fuerza en los soportes de la suspensión delantera de 3034.6 N y 2518.7 N mostró un desplazamiento máximo de 10.00 mm en las zonas más críticas, mientras que en otras áreas las deformaciones fueron mínimas. El esfuerzo equivalente alcanzó un valor máximo de 541.49 MPa. Además, el coeficiente de seguridad presentó un valor mínimo de 0.695.

Figura 118. Esfuerzos equivalentes del chasis original del cuarto análisis.



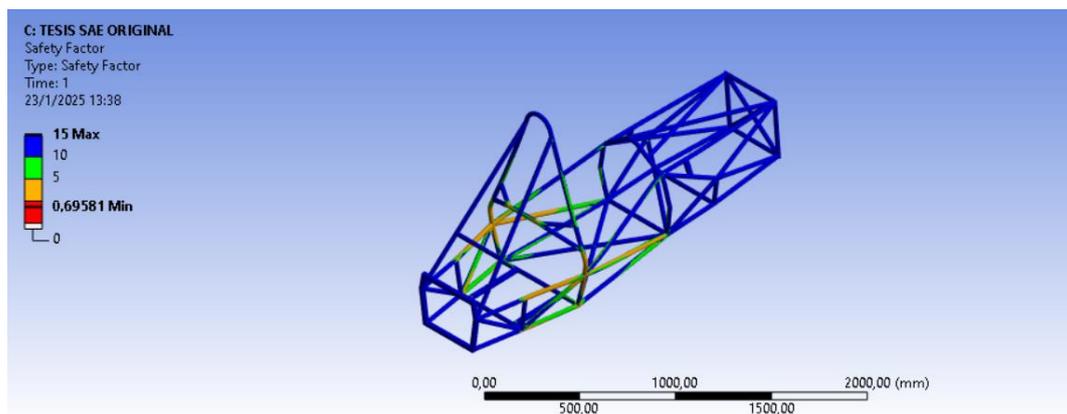
Fuente: Autores.

Figura 119. Deformación del chasis original del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

Figura 120. Coeficiente de seguridad del chasis original del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

6.2.4 Análisis por elemento finitos con la estructura modificada.

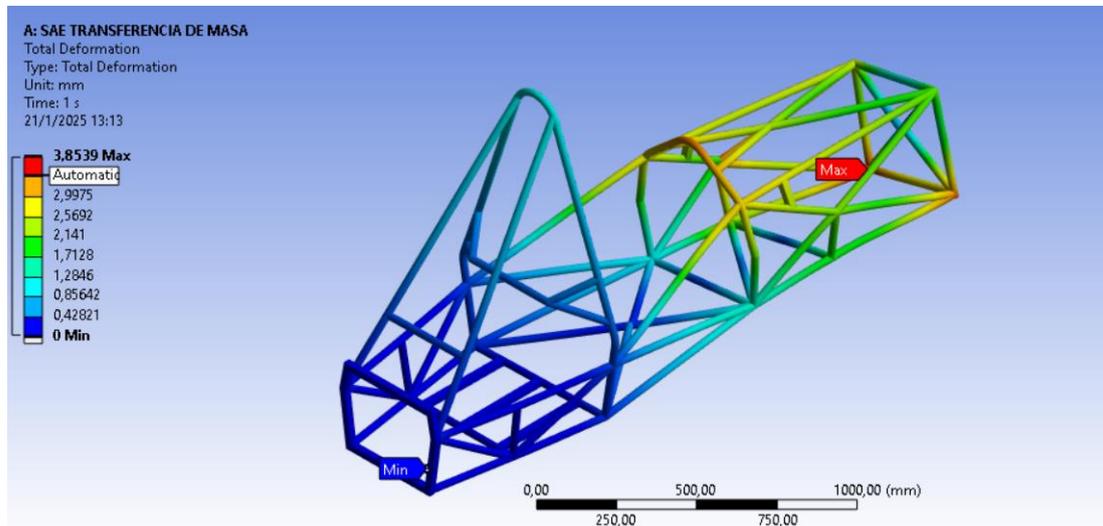
Análisis de rigidez torsional.

En el análisis estructural del chasis tubular, las fuerzas aplicadas, con magnitudes de 3423.05 N, 3590.80 N, 3777.19 N, 3898.35 N, se ubicaron en puntos de anclaje de la suspensión delantera y las restricciones o sujeciones se ubicaron en los puntos de anclaje de la suspensión trasera.

Para el primer análisis empleando una fuerza de 3423.05 N, los resultados del análisis muestran una distribución de esfuerzos equivalentes, alcanzando un máximo de 240.53 MPa en los puntos más críticos, con la característica de coloración roja dentro del

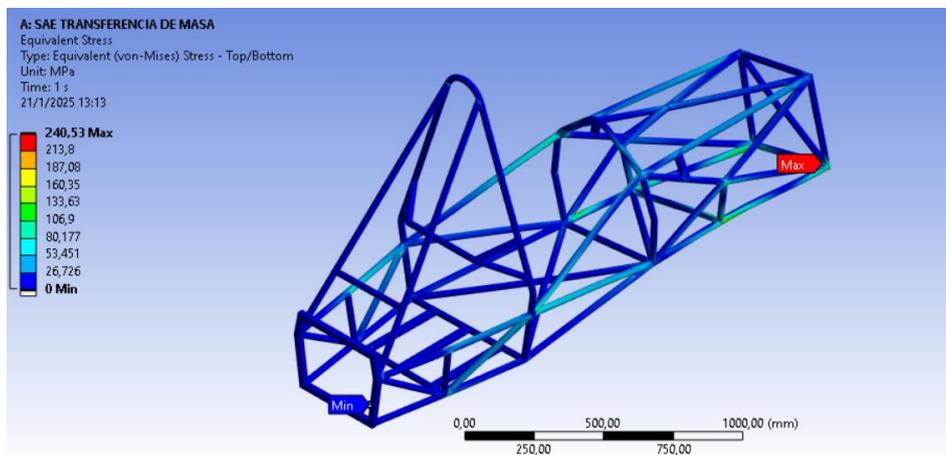
límite elástico del material (435 MPa). La deformación del chasis expresada en mm, es igual a 3,8539 mm y el coeficiente de seguridad es de 1,8085 garantizando que el diseño es seguro y resistente bajo las condiciones de carga aplicadas.

Figura 121. Deformación del chasis modificado de la primera simulación.



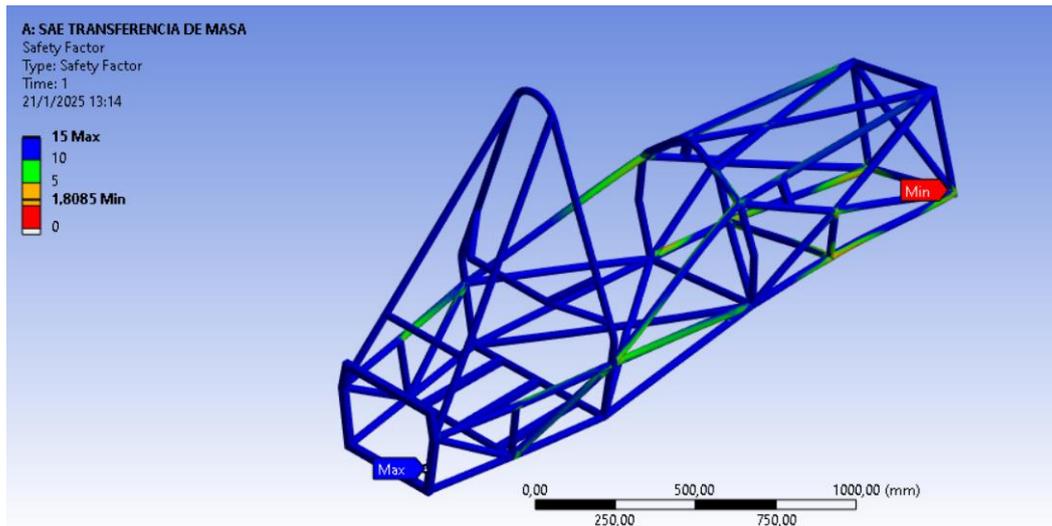
Fuente: Autores.

Figura 122. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado en la primera simulación.



Fuente: Autores.

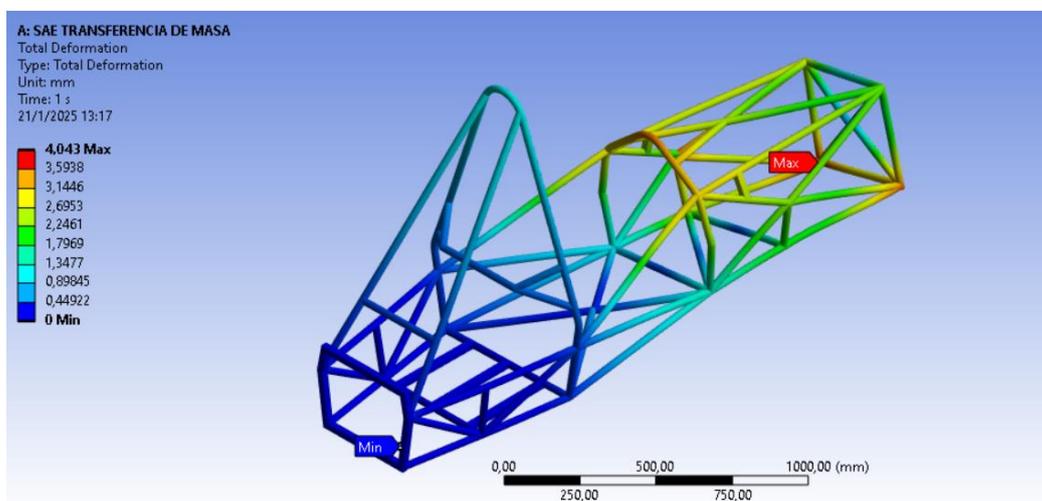
Figura 123. Coeficiente de seguridad del chasis modificado de la primera simulación.



Fuente: Autores.

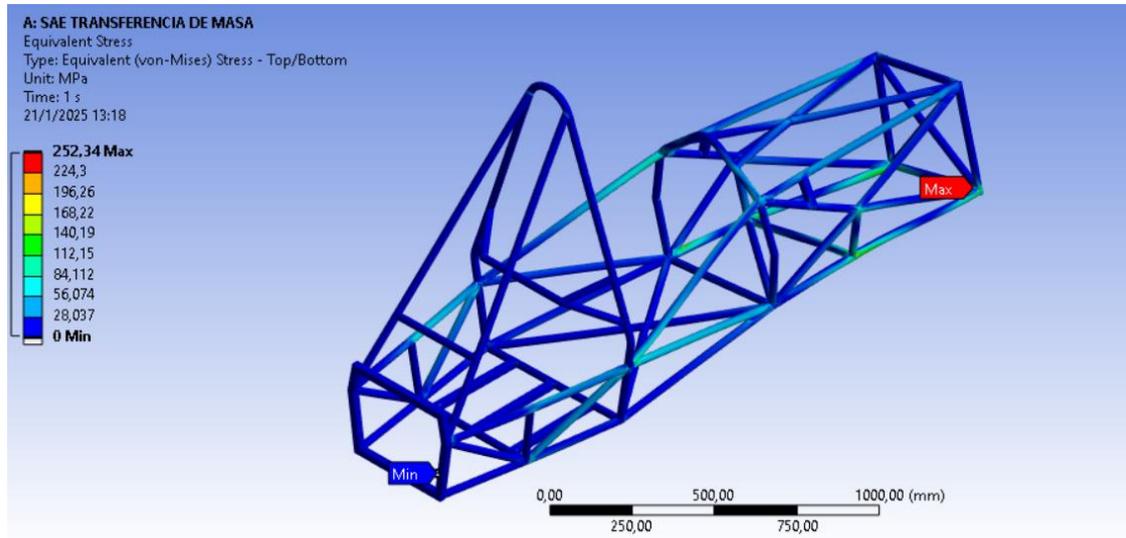
El segundo análisis empleando una fuerza de 3590.80 N, los resultados muestran una distribución de esfuerzos equivalentes, alcanzando un máximo de 252,34 MPa en los puntos más críticos. La deformación del chasis expresada en mm, es igual a 4,043 mm y el coeficiente de seguridad es de 1,7239 garantizando que el diseño es seguro y resistente bajo las condiciones de carga aplicadas.

Figura 124. Deformación del chasis modificado del segundo análisis.



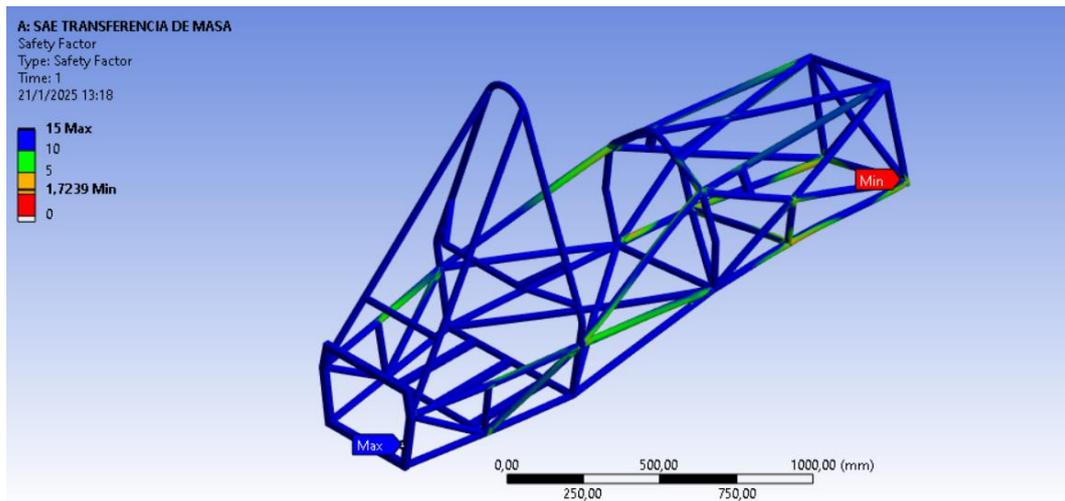
Fuente: Autores.

Figura 125. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado del segundo análisis.



Fuente: Autores.

Figura 126. Coeficiente de seguridad del chasis modificado del segundo análisis.

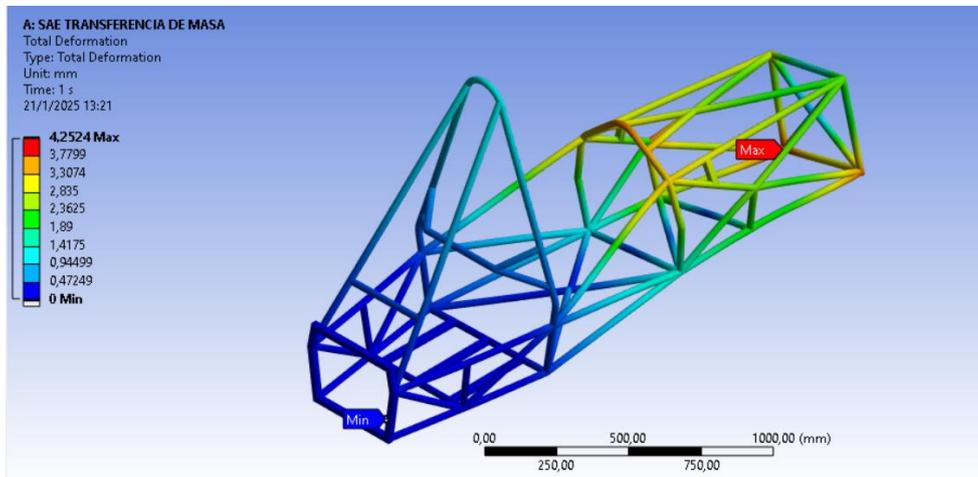


Fuente: Autores.

El tercer análisis, utilizando una fuerza de 3777.19 N, arrojó una distribución de esfuerzos equivalentes con un valor máximo de 265,41 MPa en las zonas más críticas de la estructura. La deformación total del chasis, expresada en milímetros, alcanzó 4.2524 mm.

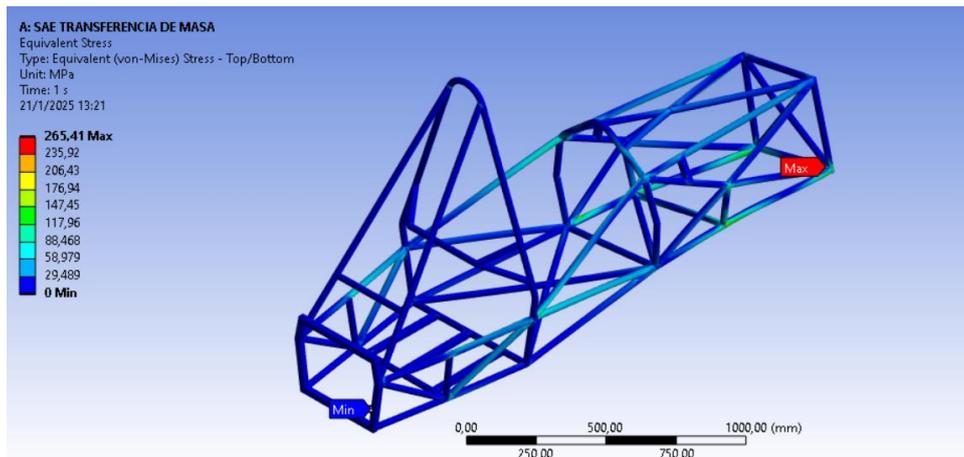
Asimismo, el coeficiente de seguridad calculado fue de 1.639, lo que confirma que el diseño garantiza una estructura capaz de soportar de manera segura las condiciones de carga aplicadas, manteniendo su integridad y confiabilidad operativa.

Figura 127. Deformación del chasis modificado del tercer análisis



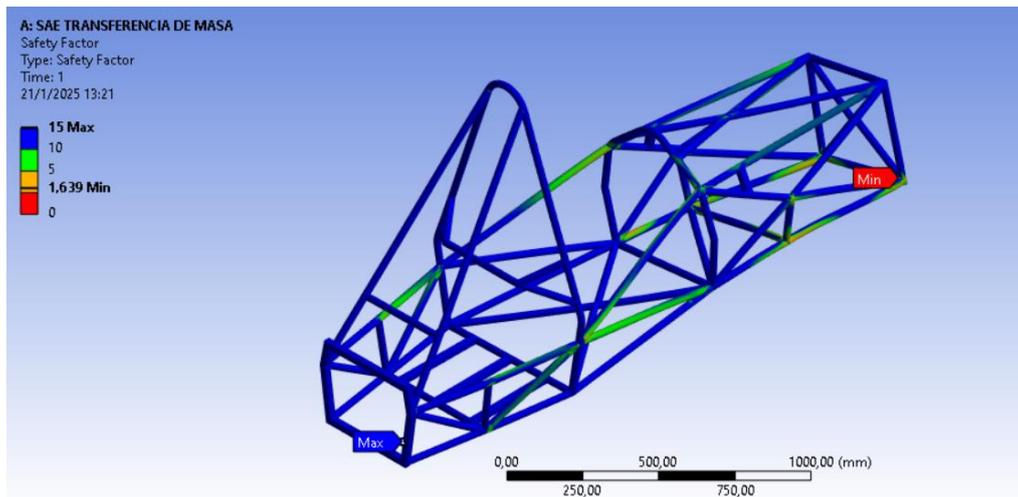
Fuente: Autores.

Figura 128. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado del tercer análisis.



Fuente: Autores.

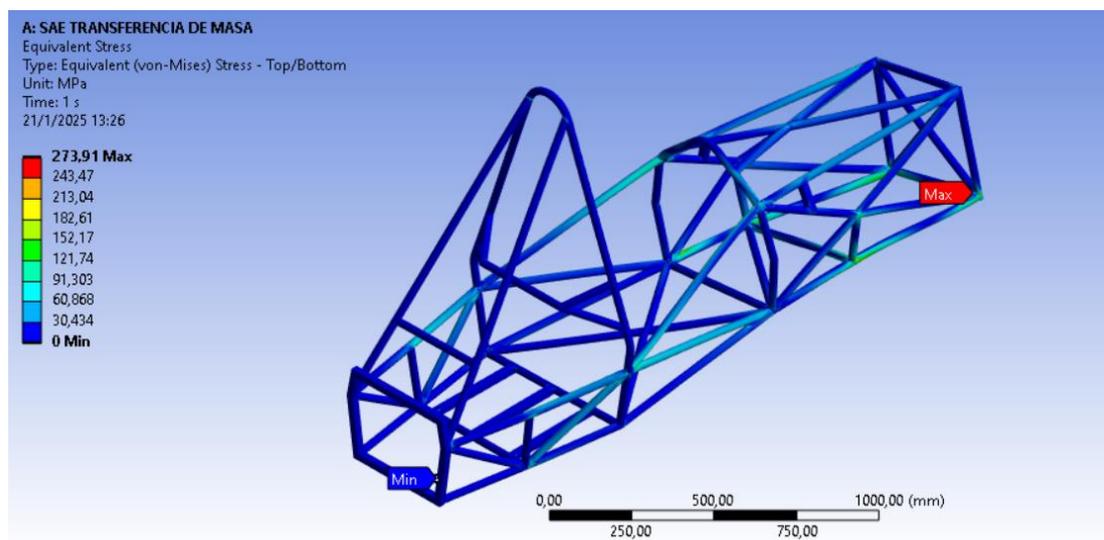
Figura 129. Coeficiente de seguridad del chasis modificado del tercer análisis.



Fuente: Autores.

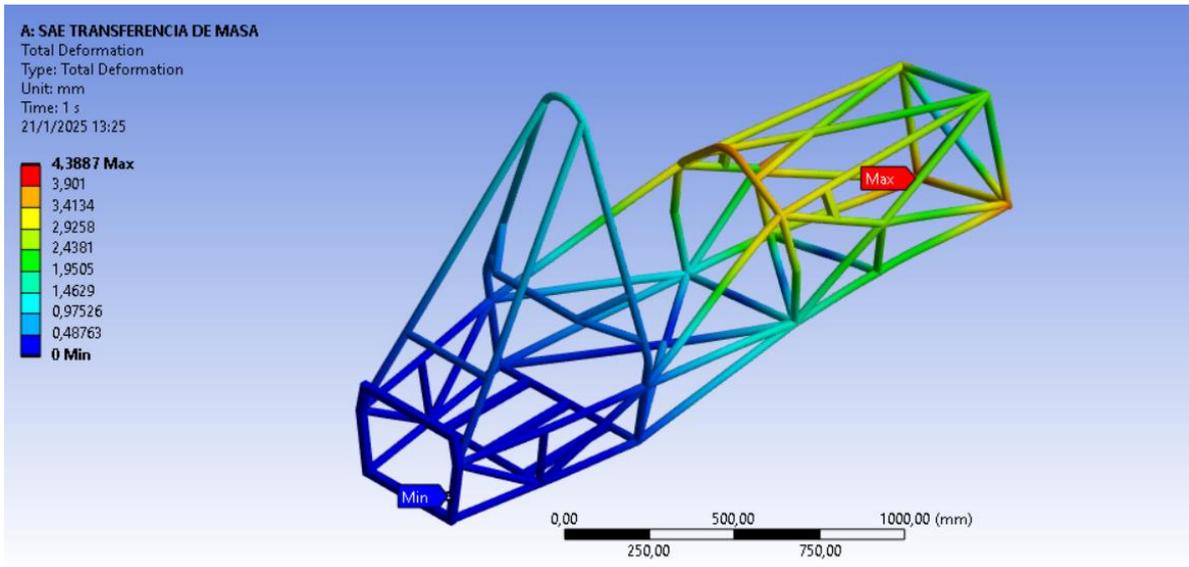
El cuarto análisis, con una fuerza aplicada de 3590.80 N, reveló una distribución de esfuerzos equivalentes que alcanzó un valor máximo de 273,91 MPa en las zonas más críticas de la estructura. La deformación total del chasis, medida en milímetros, fue de 4.3887 mm. Además, el coeficiente de seguridad fue de 1.5881.

Figura 130. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado del cuarto análisis.



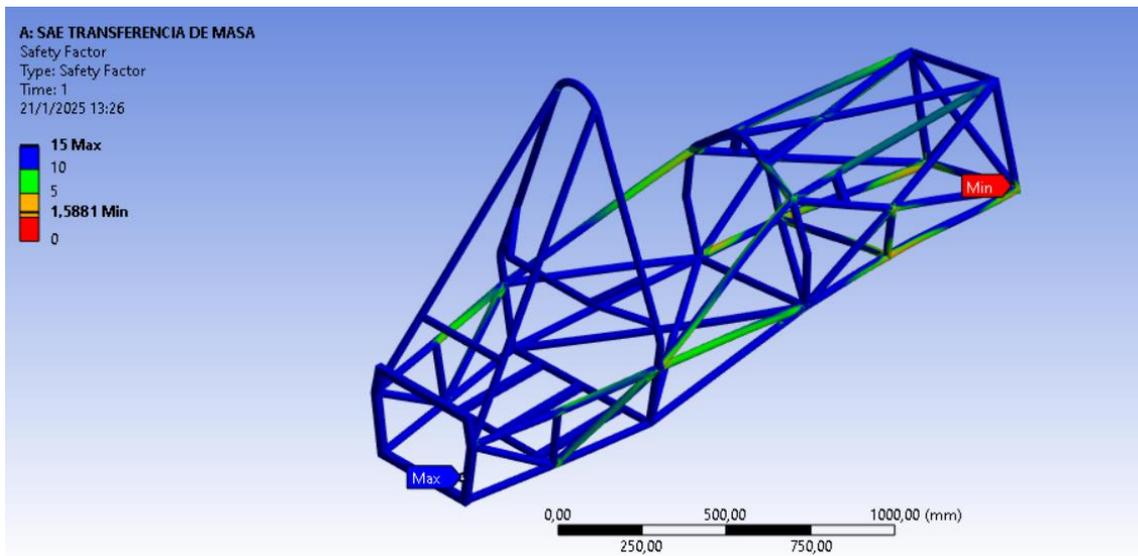
Fuente: Autores.

Figura 131. Deformación del chasis modificado del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

Figura 132. Coeficiente de seguridad del chasis modificado del cuarto análisis.



Fuente: Autores.

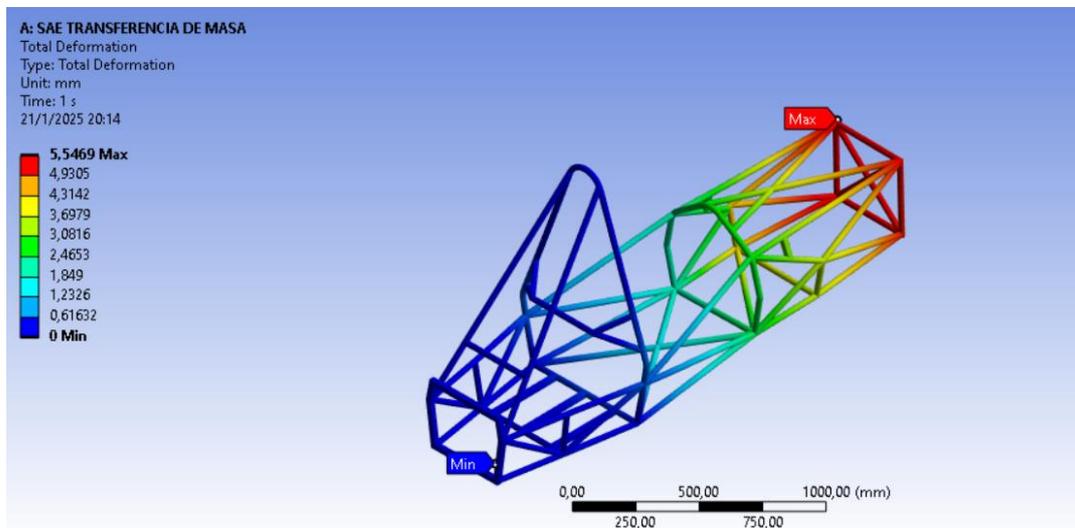
Análisis de rigidez longitudinal.

Para analizar la rigidez longitudinal, se considera la carga vertical generada por la desaceleración, distribuida en las suspensiones delantera y trasera. Los resultados revelan

el esfuerzo total soportado y la deformación máxima, evaluando su impacto en la estabilidad estructural durante la frenada.

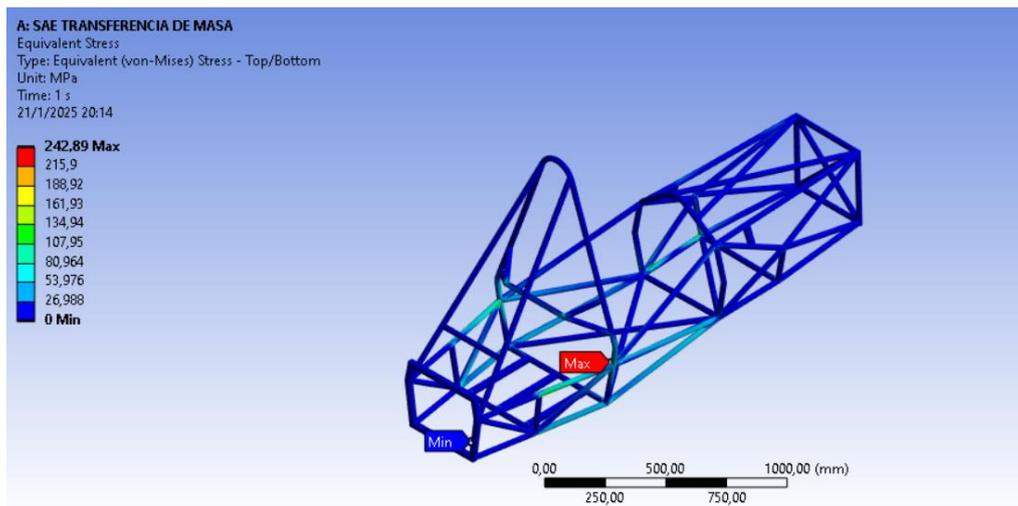
El análisis de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 2670.4 N, mostró un desplazamiento máximo de 5,5469 mm y deformaciones mínimas en otras áreas. El esfuerzo equivalente alcanzó un máximo de 242,89 MPa, mientras que el coeficiente de seguridad más bajo fue de 1.7909, indicando que la estructura soporta las cargas con un margen adecuado.

Figura 133. Deformación del chasis modificado primera simulación.



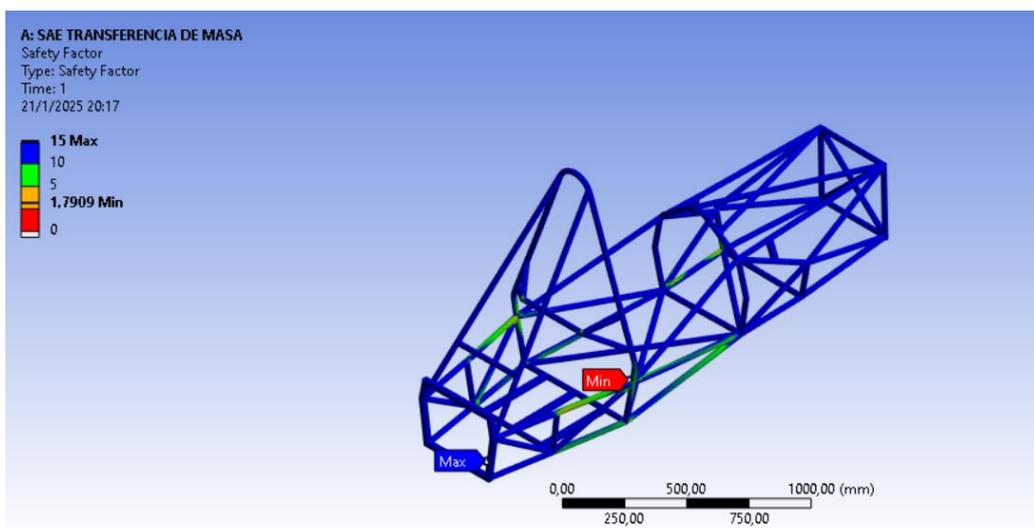
Fuente: Autores.

Figura 134. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado de la primera simulación.



Fuente: Autores.

Figura 135. Coeficiente de seguridad del chasis modificado de la primera simulación.

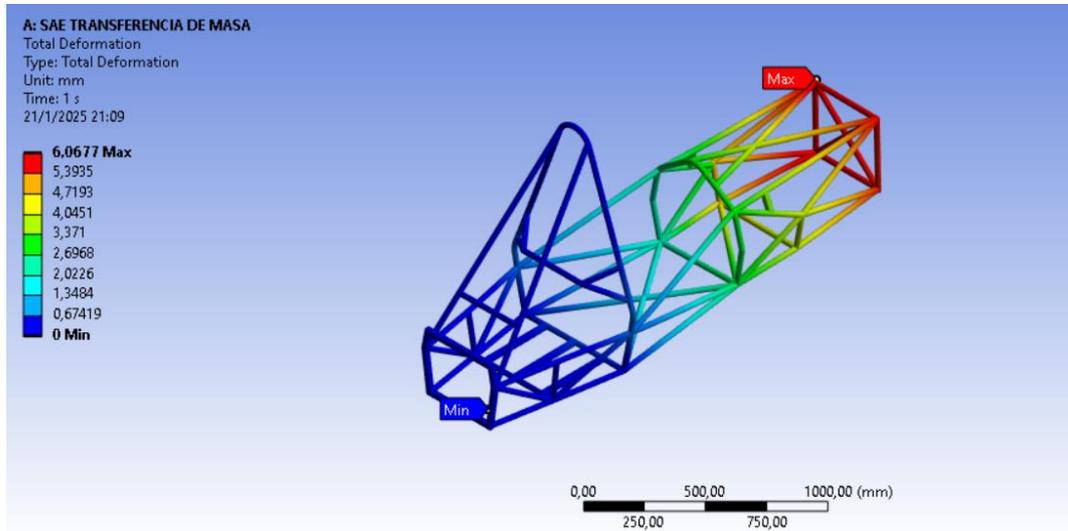


Fuente: Autores.

El análisis de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 2789,9 N, reveló un esfuerzo máximo de 273.24 MPa, un desplazamiento máximo de 6.0677 mm en las zonas más críticas. El coeficiente de seguridad de 1.592 en

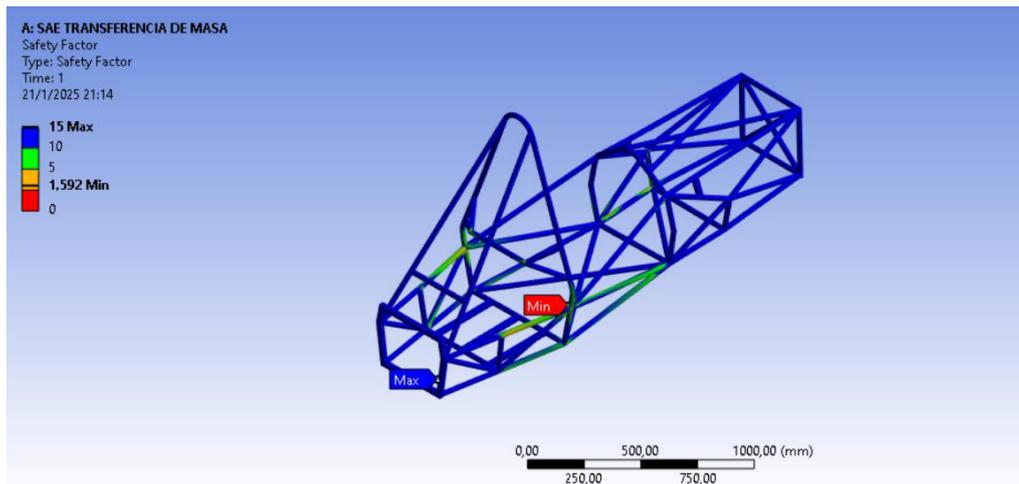
los puntos más vulnerables confirma que la estructura soporta las cargas aplicadas de manera segura.

Figura 136. Deformación del chasis modificado del chasis de la segunda simulación.



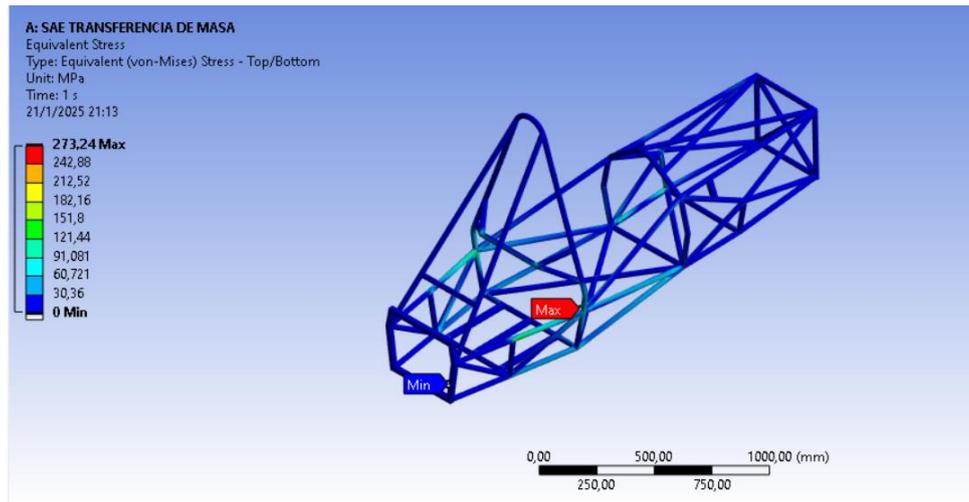
Fuente: Autores.

Figura 137. Coeficiente del chasis modificado de seguridad segunda simulación.



Fuente: Autores.

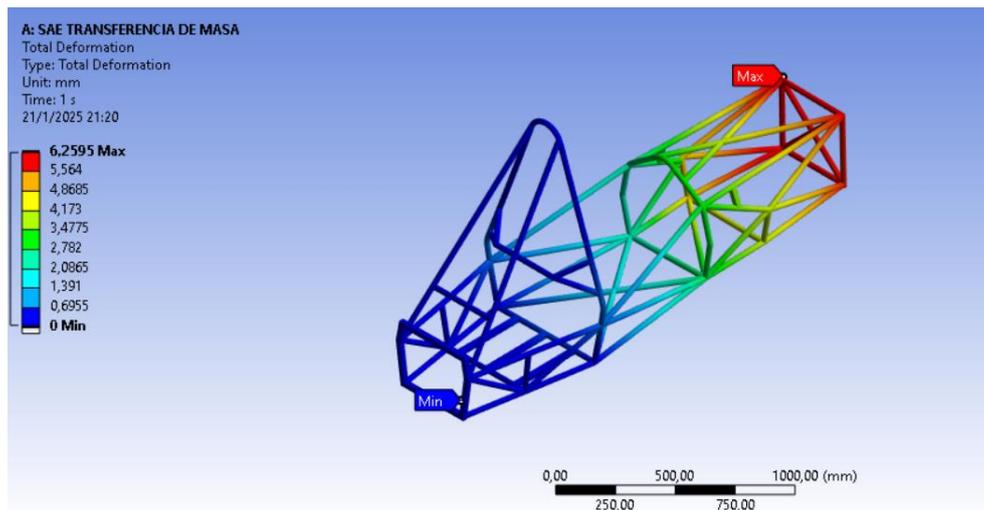
Figura 138. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado segunda simulación.



Fuente: Autores.

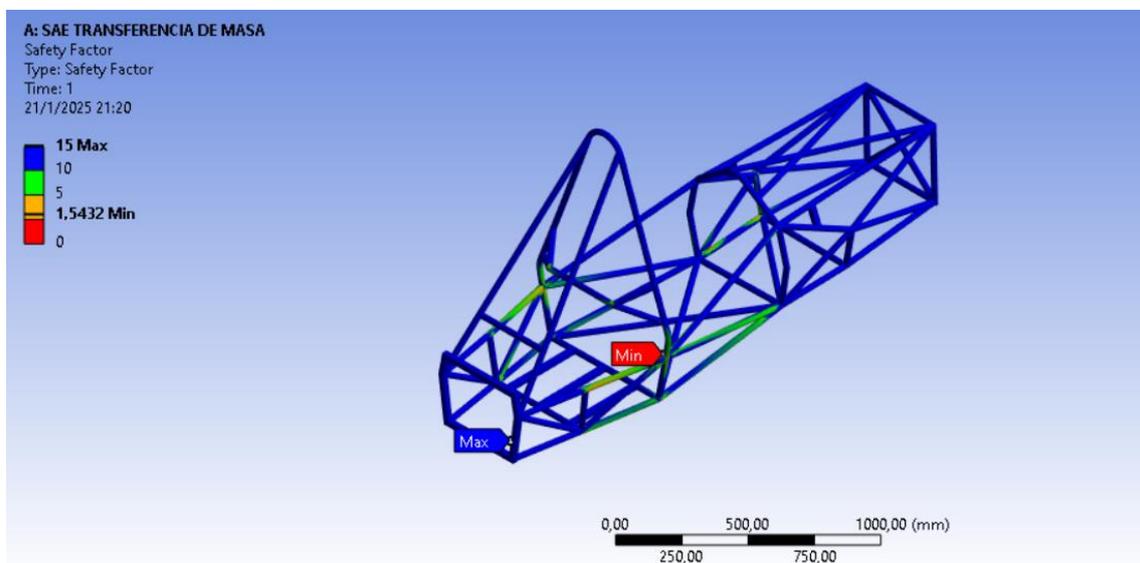
La valoración de rigidez longitudinal, aplicando una fuerza en sus soportes de la suspensión delantera de 2941.7 N, mostró que el esfuerzo equivalente alcanzó un valor máximo de 281.88 MPa en áreas específicas de la estructura. En cuanto al desplazamiento, se registró un máximo de 6.2595 mm en las zonas más críticas, mientras que en otras áreas la deformación fue prácticamente inexistente. El coeficiente de seguridad presentó un valor mínimo de 1.5432 en las áreas más vulnerables, lo que asegura que la estructura puede soportar las cargas aplicadas con un margen de seguridad adecuado.

Figura 139. Deformación del chasis modificado tercera simulación.



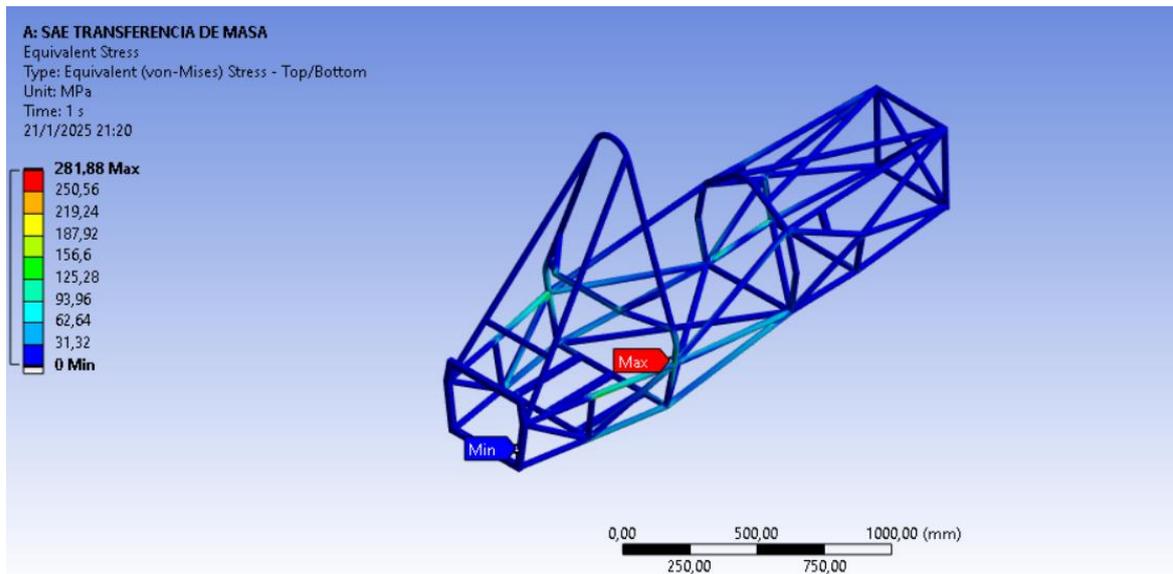
Fuente: Autores.

Figura 140. Coeficiente de seguridad del chasis modificado tercera simulación.



Fuente: Autores.

Figura 141. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado tercera simulación.



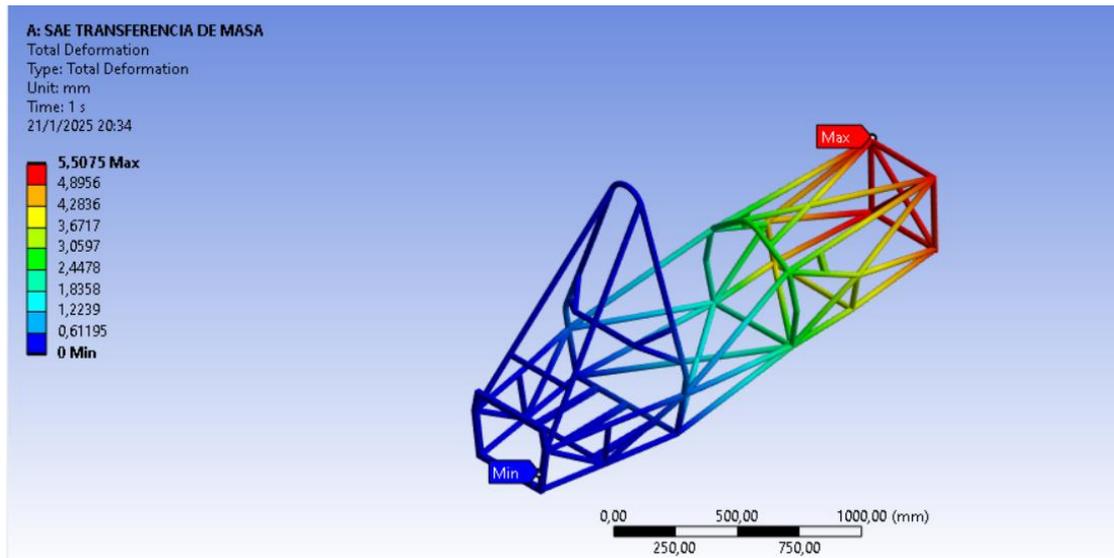
Fuente: Autores.

Análisis del frenado.

Durante la frenada, las fuerzas longitudinales generadas por la desaceleración juegan un papel crucial en la respuesta estructural del chasis tubular. Estas fuerzas, que incluyen componentes tanto verticales como horizontales, se transfieren a través de los puntos de anclaje de las suspensiones delantera y trasera. Este proceso somete al chasis a cargas significativas que deben ser soportadas de manera eficiente para garantizar la estabilidad del vehículo y la integridad estructural bajo condiciones dinámicas.

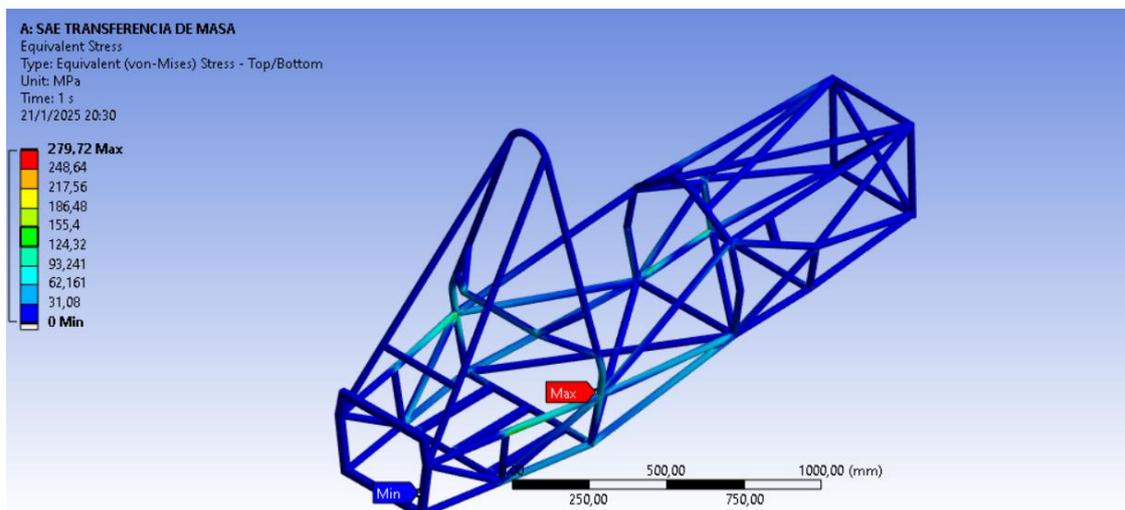
El primer análisis del frenado empleando una fuerza en los soportes de la suspensión delantera de 2670.4 N y 2216.4 N, mostró un esfuerzo máximo de 279.72 MPa y un desplazamiento máximo de 5.5075 mm en las zonas críticas, con deformaciones insignificantes en otras áreas. El coeficiente de seguridad mínimo de 1.7539 asegura que las cargas aplicadas son soportadas con un margen adecuado.

Figura 142. Deformación del chasis modificado primera simulación.



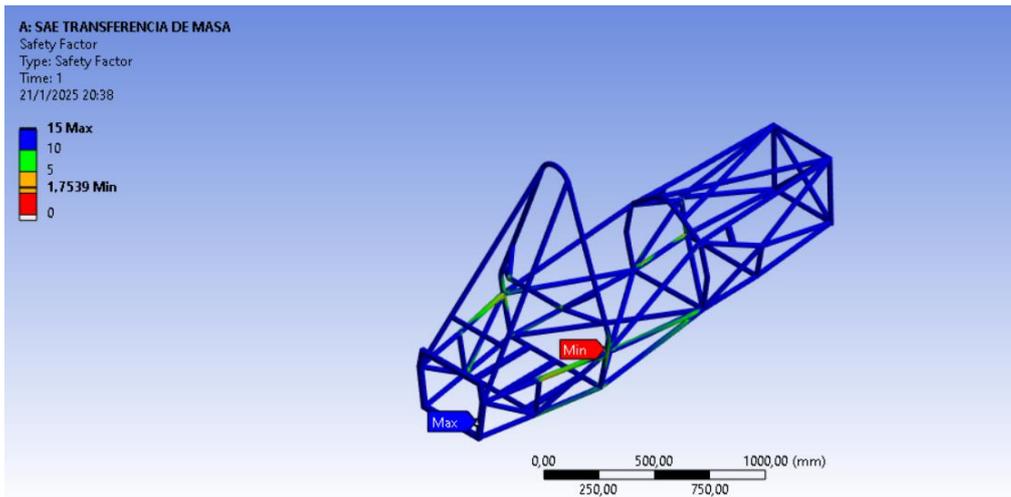
Fuente: Autores.

Figura 143. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado primera simulación.



Fuente: Autores.

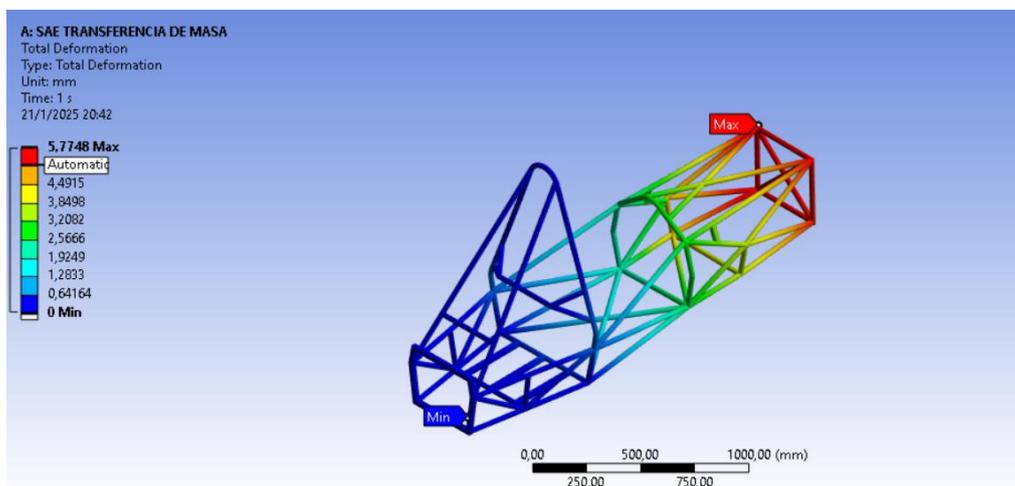
Figura 144. Coeficiente de seguridad del chasis modificado primera simulación.



Fuente: Autores.

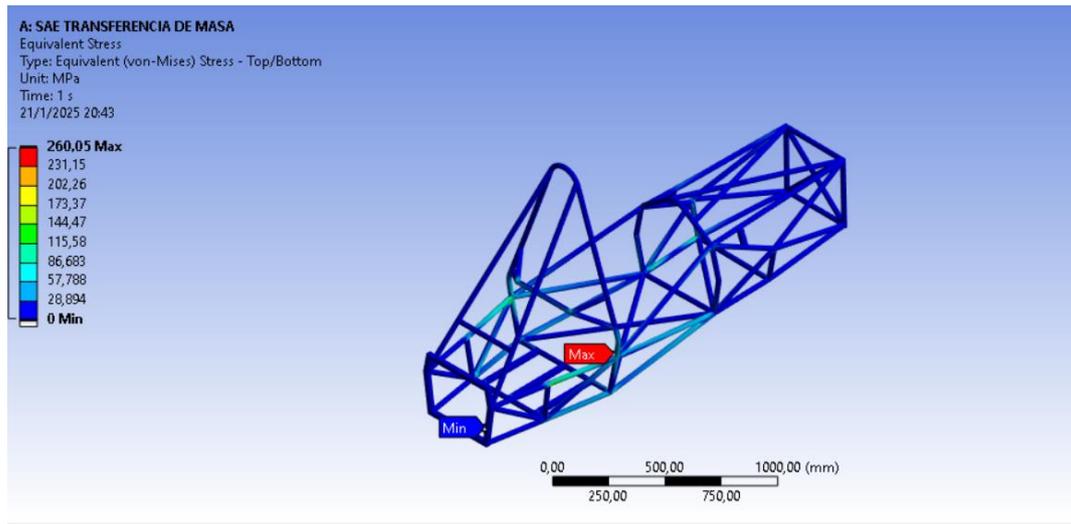
La segunda evaluación de la estructura, empleando una fuerza en los soportes de la suspensión delantera de 2798.9 N y 2323.1 N mostró un desplazamiento máximo de 5.7748 mm en las zonas más críticas, mientras que en otras áreas las deformaciones fueron mínimas. El esfuerzo equivalente alcanzó un valor máximo de 260.05 MPa. Además, el coeficiente de seguridad presentó un valor mínimo de 1.6728 en las áreas más vulnerables

Figura 145. Deformación del chasis modificado segunda simulación.



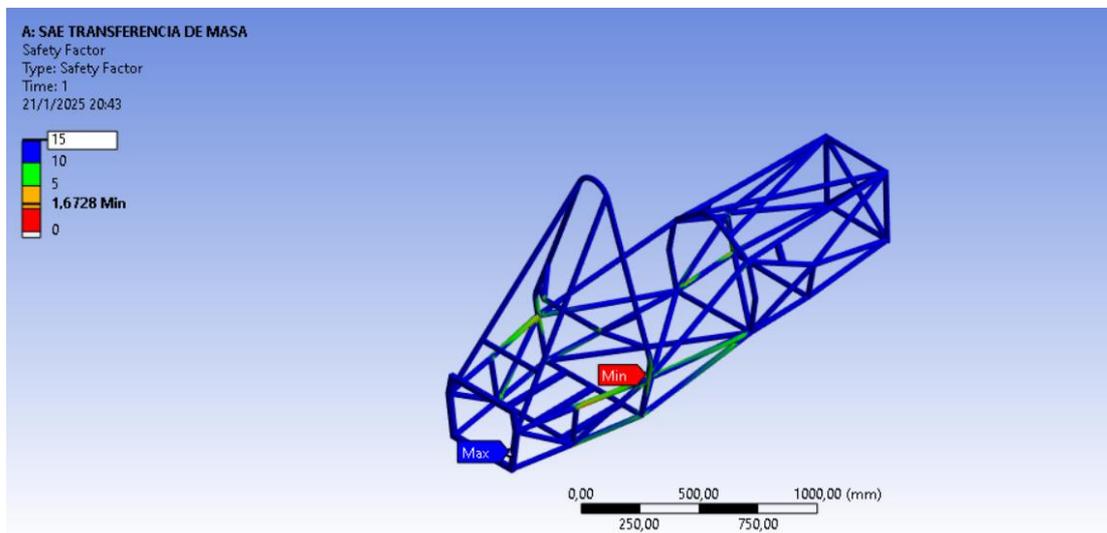
Fuente: Autores.

Figura 146. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado segunda simulación.



Fuente: Autores.

Figura 147. Coeficiente de seguridad del chasis modificado segunda simulación.

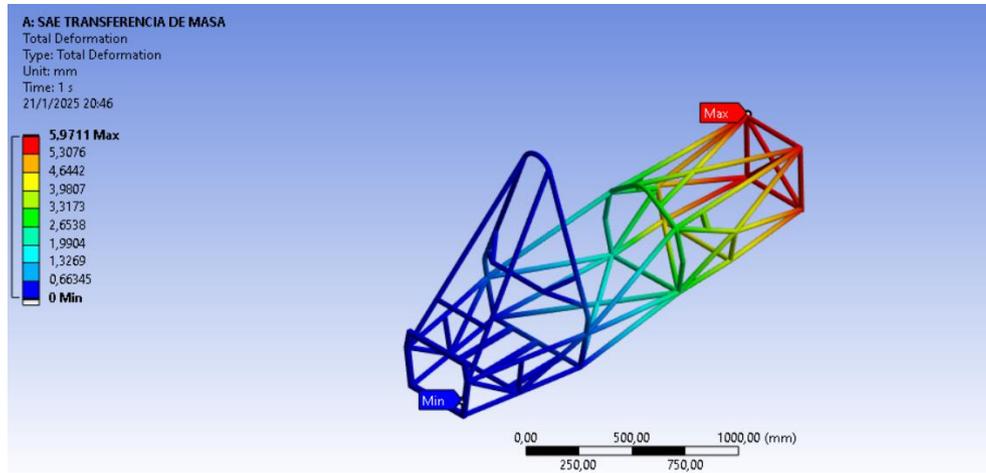


Fuente: Autores.

La evaluación de la estructura aplicando fuerzas en los soportes de la suspensión delantera de 2941.7 N y 2441.6 N, registró un desplazamiento máximo de 5.9711 mm, como se observa en la primera imagen, mientras que las deformaciones en otras áreas fueron insignificantes. El análisis de esfuerzo equivalente, mostrado en la segunda imagen, alcanzó un valor máximo de 265.68 MPa en puntos críticos de la estructura. Por último,

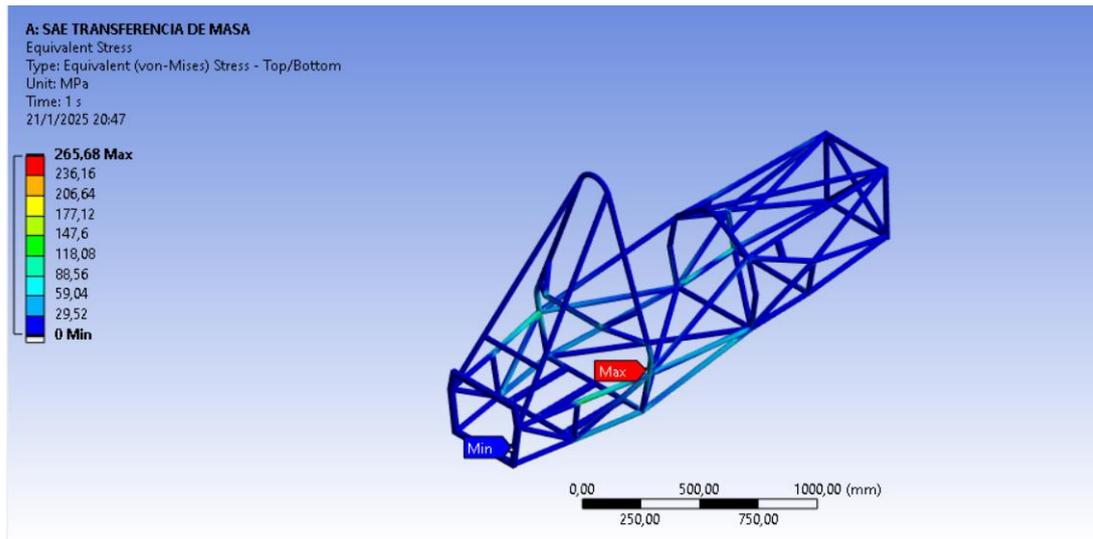
el coeficiente de seguridad, ilustrado en la tercera imagen, presentó un valor mínimo de 1.6373.

Figura 148. Deformación del chasis modificado tercera simulación.



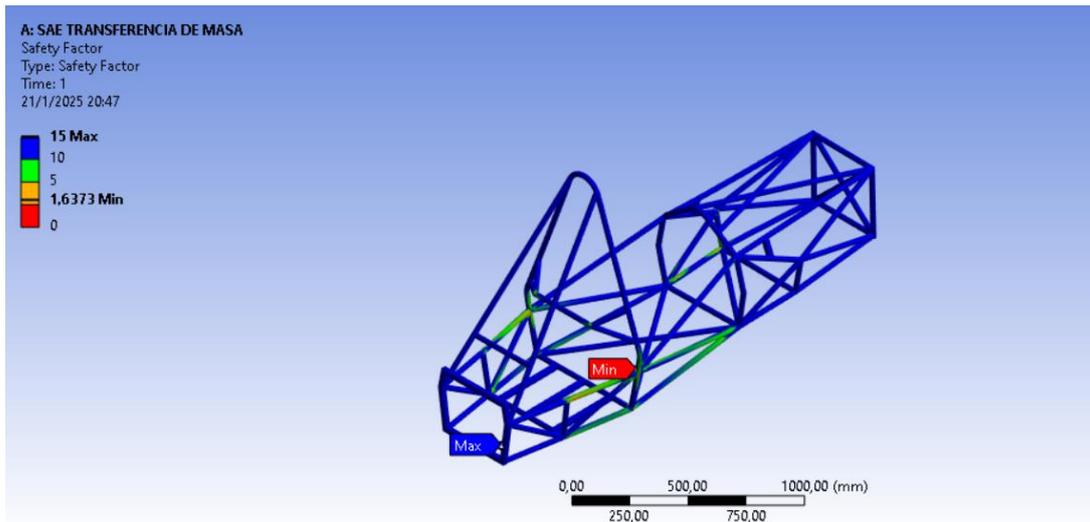
Fuente: Autores.

Figura 149. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado tercera simulación.



Fuente: Autores.

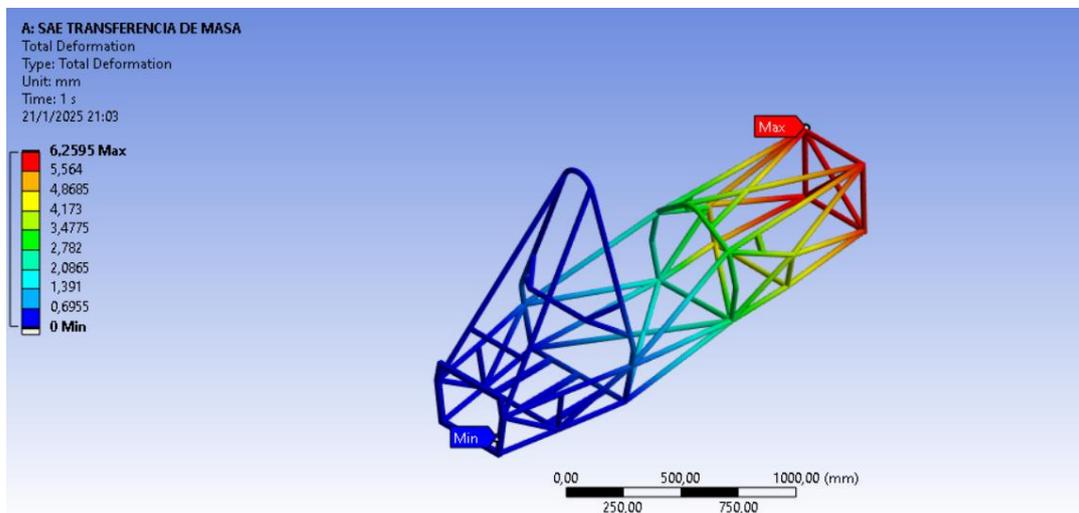
Figura 150. Coeficiente de seguridad del chasis modificado tercera simulación.



Fuente: Autores.

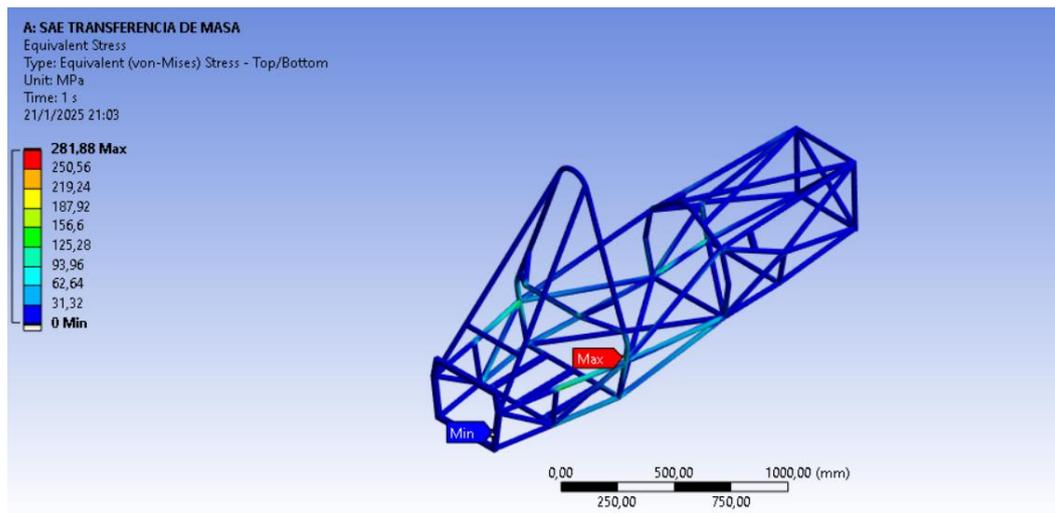
La evaluación de la estructura aplicando fuerzas en los soportes de la suspensión delantera de 3034,6 N y 2518,7 N mostró un desplazamiento máximo de 6.2595 mm, con deformaciones insignificantes en otras áreas. El esfuerzo equivalente máximo fue de 281.88 MPa, mientras que el coeficiente de seguridad alcanzó un valor mínimo de 1.5432."

Figura 151. Deformación del chasis del chasis modificado cuarta simulación.



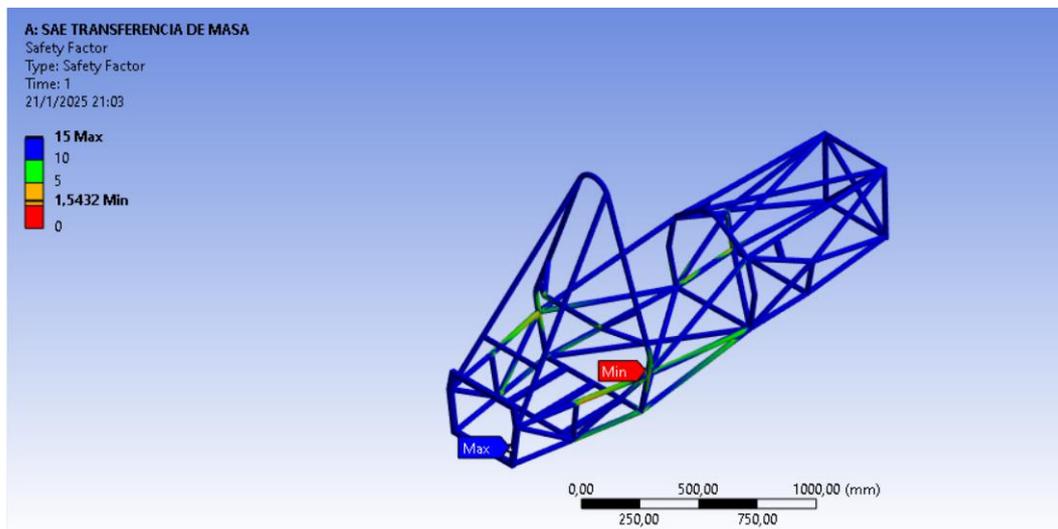
Fuente: Autores.

Figura 152. Esfuerzos equivalentes del chasis modificado cuarta simulación.



Fuente: Autores.

Figura 153. Coeficiente de seguridad del chasis modificado cuarta simulación.

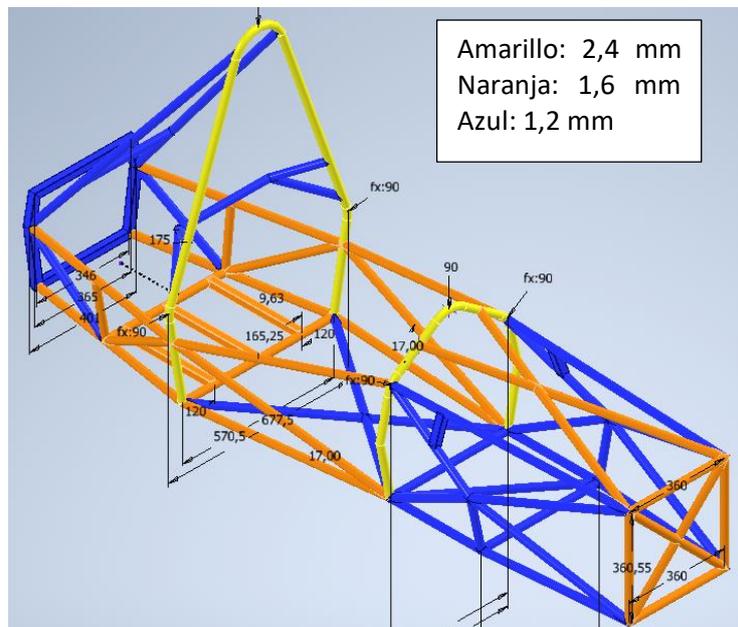


Fuente: Autores.

6.3 Diseño Optimizado del Chasis: Selección de Material y Grosor del Tubo.

Como condición inicial tenemos un grosor determinado en los miembros estructurales de los chasis pertenecientes al fórmula SAE, en la figura. Se evidencia el grosor de los tubos empleados en la fabricación del chasis, el color amarillo describe un grosor de 2.4 mm, el color naranja describe un grosor de 1.6 mm y por último el color azul describe un grosor de 1.2 mm. El diámetro exterior de todos los tubos empleados es de 25, 4 mm o una pulgada.

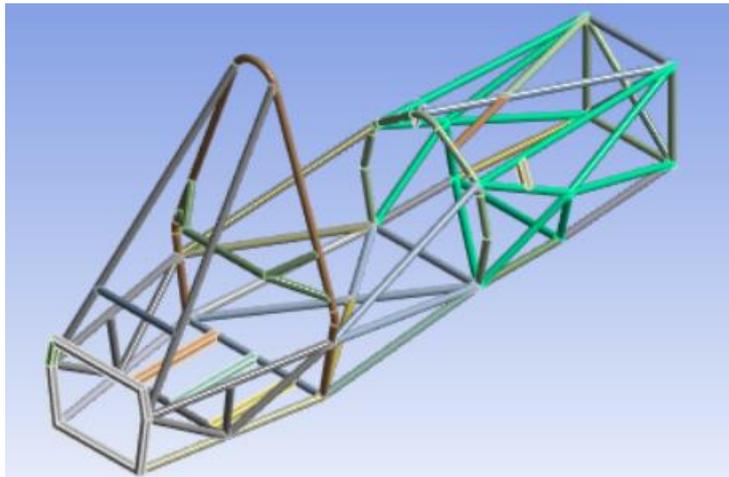
Figura 154. Espesor de miembros estructurales.



Fuente: autores.

Para empezar con la optimización se realiza la selección de los miembros estructurales que sufren mayor deformación y una mayor probabilidad a fallar debido a las cargas aplicadas en el análisis anterior. Para ello en la figura. Se resalta dichos miembros estructurales con el color verde.

Figura 155. Miembros a optimizarse.

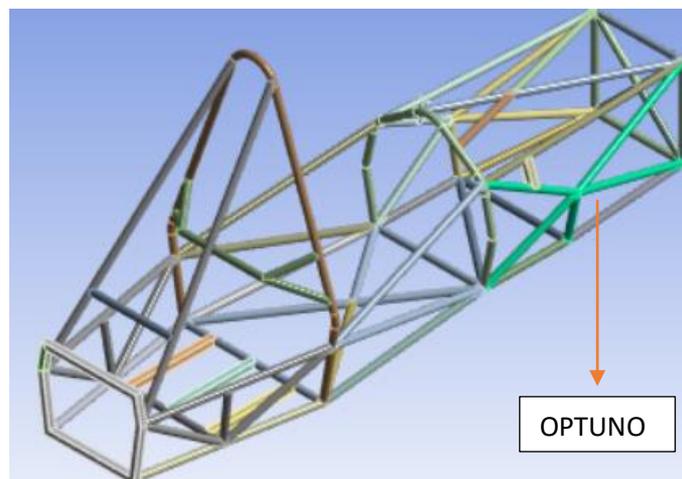


Fuente: Autores.

Los componentes tubulares acero optimizados se han etiquetado de la siguiente manera:

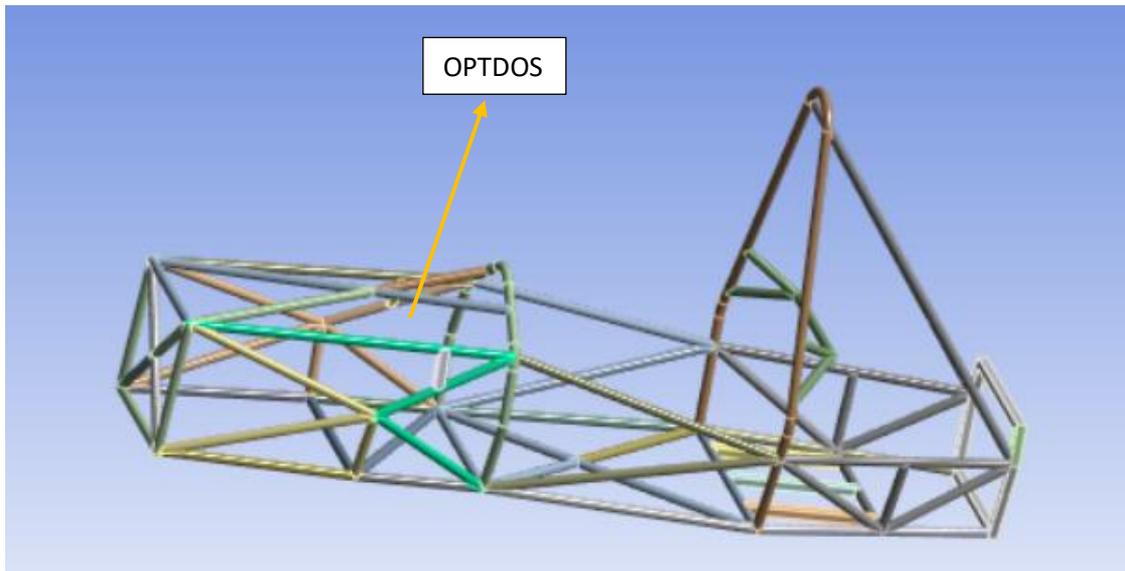
- 1) OPTUNO
- 2) OPTDOS
- 3) OPTTRES
- 4) OPTCUATRO
- 5) OPTCINCO

Figura 156. Registro *OPTUNO*.



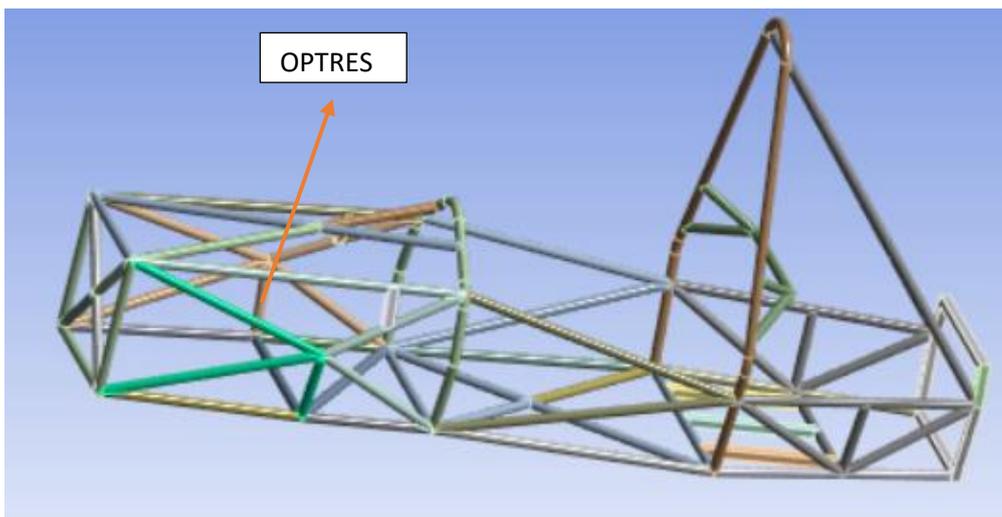
Fuente: autores.

Figura 157. Registro OPTDOS.



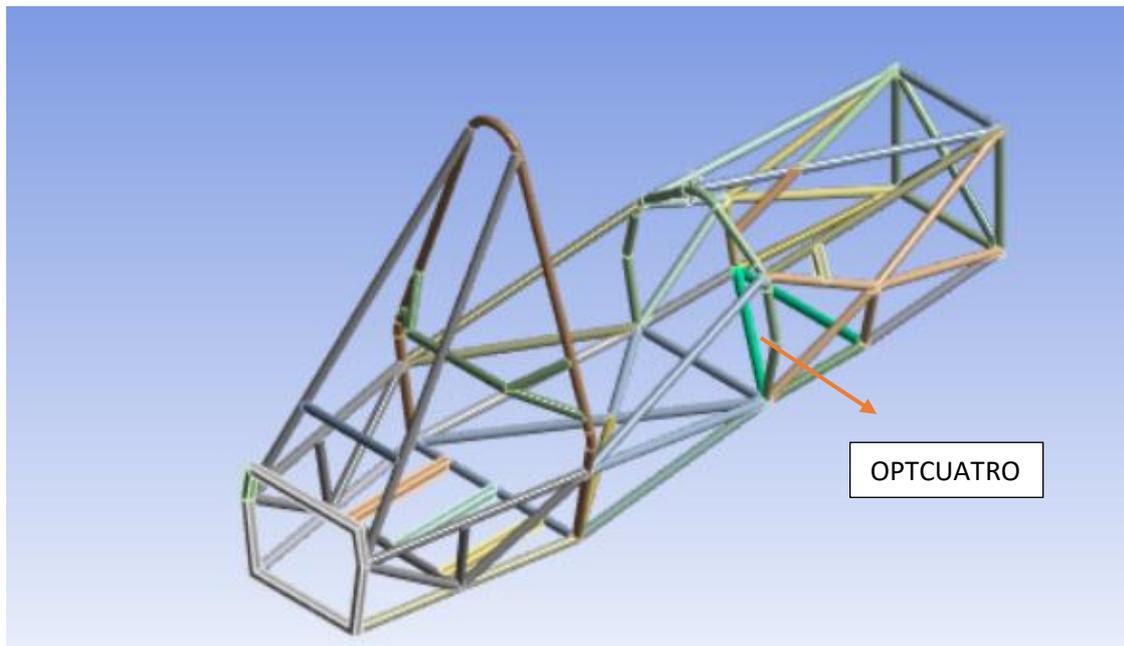
Fuente: Autores.

Figura 158. Registro OPTRES.



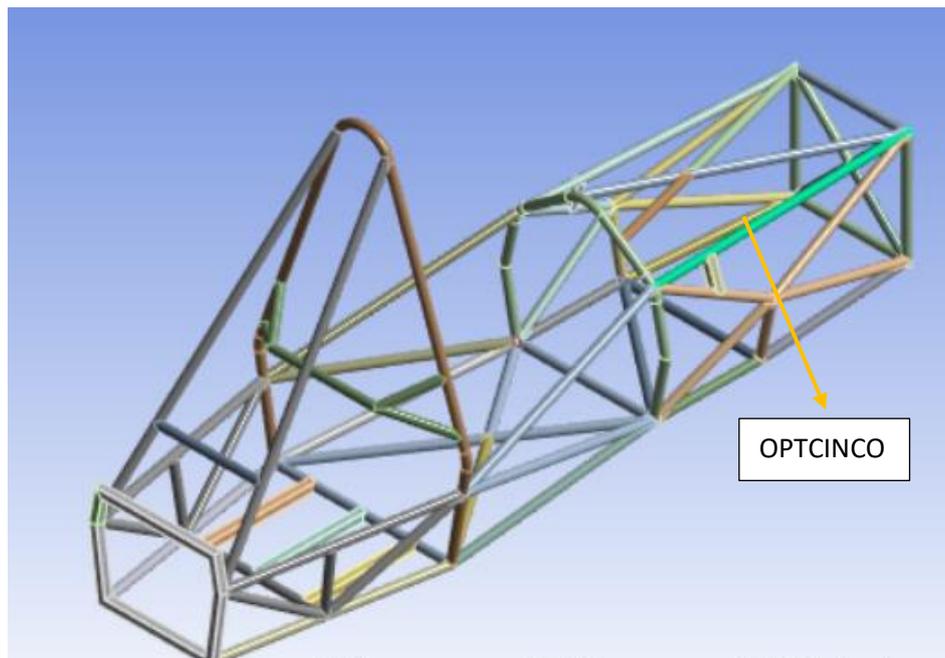
Fuente: Autores.

Figura 159. Registro OPTCUATRO.



Fuente: Autores.

Figura 160. Registro OPTCINCO.



Fuente: Autores.

Los materiales empleados en la optimización son el acero SAE 4130 (original), acero SAE 1010 y acero SAE 1020. En las siguientes tablas se comparten las propiedades mecánicas.

Tabla 28. Propiedades Mecánicas del Acero 4130.

Deformación Estática	436 MPA
Límite de Resistencia a la Tracción	669 MPA
Elongación	25%
Dureza	93 RB
Módulo de Elasticidad	205 GPa

Fuente: Santos, S. (2024).

Tabla 29. Propiedades Mecánicas del Acero 1010.

Deformación Estática	305 MPA
Límite de Resistencia a la Tracción	365 MPA
Poisson	0,29
Densidad	7,9 g/cm ³
Módulo de Elasticidad	210 GPa

Fuente: Santos, S. (2024).

Tabla 30. Propiedades Mecánicas del Acero 1020.

Deformación Estática	384 MPA
Límite de Resistencia a la Tracción	472 MPA
Poisson Ratio	0,29
Densidad	7,870 g/cm ³
Módulo de Elasticidad	186 GPa

Fuente: Santos, S. (2024).

Para la optimización del material y del grosor de los miembros de estructurales se aplicó una metodología llamada “Response Surface Optimization”, la cual me permite mediante la parametrización de grosores de los miembros estructurales realizar cambios de tal manera que se obtenga un coeficiente de seguridad apropiado para la estructura. Esta metodología me permite evaluar diversos y grosores y materiales al mismo tiempo, reduciendo el tiempo de simulación.

Rigidez torsional.

Para la optimización empleando material y grosor dentro de los miembros estructurales, en el apartado de rigidez torsional se ha tomado el valor con mayor con mayor impacto en la estructura siendo este un total de 3898 N, empleando las mismas restricciones en la geometría de la suspensión trasera y la misma aplicación de fuerza en los anclajes de la suspensión delantera.

En optimización se procede a dar tres posibles candidatos para cada uno de los miembros estructurales a optimizar, siendo estos tres posibles grosores los cuales van a tener su correspondiente coeficiente de seguridad global.

Tabla 31. Optimización para rigidez torsional de miembros estructurales.

MATERIAL	SAE 4130					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,6	1,6	1,2	1,2	1,2	1,582
PUNTO CANDIDATO 2	1,6	1,6	1,2	1,2	1,2	1,5836
PUNTO CANDIDATO 3	1,6	1,6	1,2	1,2	1,2	1,5844

MATERIAL	SAE 1010					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,6	1,6	1,2	1,2	1,44-1,6	1,12
PUNTO CANDIDATO 2	1,6	1,6	1,2	1,2	1,441-1,6	1,12
PUNTO CANDIDATO 3	1,6	1,6	1,2	1,2	1,4426-1,6	1,12

MATERIAL	SAE 1020					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,6	1,6	1,2	1,2	1,44-1,6	1,404
PUNTO CANDIDATO 2	1,6	1,2	1,2	1,2	1,44-1,6	1,4041
PUNTO CANDIDATO 3	1,6	1,2	1,2	1,2	1,442-1,6	1,4042

Rigidez longitudinal.

Para el apartado de rigidez longitudinal se emplea la mayor fuerza en la reacción uno que es 3034,6 N. Para ello se obtendrán de igual manera tres posibles candidatos de grosores para cada uno de los materiales que se ha tomado como una variante para el material original.

Tabla 32. Optimización para rigidez longitudinal de miembros estructurales.

MATERIAL	SAE 4130					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,8	1,2	1,2	1,2	1,58-1,6	1,594
PUNTO CANDIDATO 2	1,8	1,2	1,2	1,2	1,6001	1,624
PUNTO CANDIDATO 3	1,8	1,2	1,2	1,2	1,6131	1,6406

MATERIAL	SAE 1010					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,8	1,2	1,2	1,2	1,76-1,8	1,1546
PUNTO CANDIDATO 2	1,8	1,2	1,2	1,2	1,755-1,8	1,1546
PUNTO CANDIDATO 3	1,8	1,2	1,2	1,2	1,749-1,8	1,1546

MATERIAL	SAE 1020					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,8	1,2	1,2	1,2	1,5869-1,6	1,4482
PUNTO CANDIDATO 2	1,8	1,2	1,2	1,2	1,6001	1,4482
PUNTO CANDIDATO 3	1,8	1,2	1,2	1,2	1,6131	1,4482

Frenado.

Para la para la simulación de frenado se ha tomado las reacciones uno y la fuerza uno de 3034,6 N y 2518, 7 N dando las posibles Optimizaciones para cada material en el apartado de grosor con su coeficiente de seguridad correspondiente.

Tabla 33. Optimización para frenado de miembros estructurales.

MATERIAL	SAE 4130					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,8	1,2	1,2	1,6	1,2	1,5348
PUNTO CANDIDATO 2	1,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,53
PUNTO CANDIDATO 3	1,8	1,2	1,2	1,8	1,2	1,55

MATERIAL	SAE 1010					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,8	1,2	1,2	1,6	1,2	1,0788
PUNTO CANDIDATO 2	1,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,08
PUNTO CANDIDATO 3	1,8	1,2	1,2	1,8	1,2	1,07

MATERIAL	SAE 1020					COEFICIENTE DE SEGURIDAD
NOMBRE	OPTUNO	OPTDOS	OPTRES	OPTCUATRO	OPTCINCO	
PUNTO CANDIDATO 1	1,8	1,2	1,2	1,6	1,2	1,35
PUNTO CANDIDATO 2	1,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,432
PUNTO CANDIDATO 3	1,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3549

6.4 Análisis de resultado.

Rigidez torsional.

Tabla 34. Resultados rigidez torsional estructura original.

Resultados de Rigidez Torsional.				
N° de simulación	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm)	Coefficiente de seguridad
Simulación 1	3423,05	368,4	2,893	1,18
Simulación 2	3590,8	386,49	3,0359	1,1255
Simulación 3	3777,19	406,5	3,1932	1,0701
Simulación 4	3898	419,53	3,295	1,036

Tabla 35. Resultados rigidez torsional estructura modificada.

Resultados de Rigidez Torsional.				
N° de simulación	Fuerza aplicada (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm)	Coefficiente de seguridad
Simulación 1	3423,05	240,53	3,8539	1,80085
Simulación 2	3590,8	252,34	4,043	1,7239
Simulación 3	3777,19	265,41	4,2524	1,639
Simulación 4	3898	273,91	4,3887	1,5881

Al comparar ambos chasis, el Chasis 1 (Primera Tabla) muestra mayor rigidez debido a sus menores deformaciones, alcanzando un máximo de 3.2955 mm. Sin embargo, también presenta mayores esfuerzos máximos, llegando hasta 419.53 MPa, y un menor coeficiente de seguridad, con un mínimo de 1.0369, lo que lo hace menos seguro bajo cargas extremas. Por otro lado, el Chasis 2 (Segunda Tabla) distribuye mejor las cargas, con esfuerzos máximos más bajos de hasta 265.41 MPa y un coeficiente de seguridad mayor, alcanzando 1.8085, aunque tiene deformaciones ligeramente superiores de hasta 4.2524 mm. En general, el Chasis 2 es más seguro y eficiente.

Rigidez longitudinal.

Tabla 36. Resultados rigidez longitudinal estructura original.

Resultados de Rigidez Longitudinal.				
N° de simulación	Fuerza vertical aplicada (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm)	Coefficiente de seguridad
Simulación 1	2670,4	441,52	8,4	0,834
Simulación 2	2798,9	462,86	8,84	0,796
Simulación 3	2942,7	486,34	9,292	0,757
Simulación 4	3034,6	501,72	9,585	0,734

Tabla 37. Resultados rigidez longitudinal estructura modificada.

Resultados de Rigidez Longitudinal.				
N° de simulación	Fuerza vertical aplicada (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm)	Coefficiente de seguridad
Simulación 1	2670,4	232,48	5,30	1,87
Simulación 2	2798,9	242,49	5,54	1,79
Simulación 3	2942,7	273,24	6.067	1,592
Simulación 4	3034,6	281.88	6.25	1.543

Comparando los resultados de rigidez longitudinal, el Chasis 1 (Primera Tabla) muestra mayores esfuerzos máximos de hasta 501.72 MPa y deformaciones más altas, con un máximo de 9.585 mm. Su coeficiente de seguridad, más bajo (0.734), indica que está más cerca del límite permisible y tiene menor margen de resistencia.

En contraste, el Chasis 2 (Segunda Tabla) presenta esfuerzos menores, alcanzando un máximo de 281.88 MPa, y deformaciones más bajas de hasta 6.25 mm. Con un coeficiente

de seguridad mínimo de 1.543, este diseño ofrece mayor capacidad para soportar las cargas aplicadas de forma segura.

En conclusión, el Chasis 2 es más eficiente y seguro, mientras que el Chasis 1 tiene menor margen para cargas adicionales.

Tabla 38. Resultados de frenado estructura original.

Resultados de frenado.					
N° de simulación	Fuerza vertical aplicada (N)	Fuerza Horizontal aplicada (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm)	Coefficiente de seguridad
Simulación 1	2670,4	2216,4	476,53	8,8	0,79
Simulación 2	2798,9	2323,1	498,77	9,21	0,755
Simulación 3	2942,7	2441,6	524,89	9,96	0,717
Simulación 4	3034,6	2518,7	541,5	10	0,695

Tabla 39. Resultados de frenado estructura modificada.

Resultados de frenado.					
N° de simulación	Fuerza vertical aplicada (N)	Fuerza Horizontal aplicada (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación máxima (mm)	Coefficiente de seguridad
Simulación 1	2670,4	2216,4	260,05	5,507	1,753
Simulación 2	2798,9	2323,1	265,68	5,778	1,678
Simulación 3	2942,7	2441,6	279,72	5,97	1,63
Simulación 4	3034,6	2518,7	281,88	6,25	1,54

En los resultados de frenado correspondientes al Chasis 1 (Primera Tabla), se observa un incremento progresivo de los esfuerzos máximos, alcanzando 541.5 MPa en la Simulación 4. Las deformaciones también aumentan, llegando a 10 mm, mientras que el coeficiente de seguridad desciende hasta 0.695. Esto indica que el diseño se encuentra

cerca de su límite permisible, siendo menos seguro y más vulnerable bajo estas condiciones.

Por otro lado, los resultados de rigidez torsional del Chasis 2 (Segunda Tabla) muestran esfuerzos significativamente menores, con un máximo de 281.88 MPa en la Simulación 4, y deformaciones controladas de hasta 6.25 mm. Además, el coeficiente de seguridad es considerablemente mayor, con un mínimo de 1.54, reflejando que este diseño es más robusto y eficiente frente a cargas torsionales.

En conclusión, el Chasis 2 destaca por su seguridad y eficiencia bajo rigidez torsional, mientras que el Chasis 1 presenta mayores riesgos debido a esfuerzos y deformaciones más elevados bajo condiciones de frenado.

Impacto lateral.

El impacto lateral, tiene una deformación en el primer chasis de 2,85 mm y para el segundo chasis es de 1.03 mm, cumpliendo con el apartado en el reglamento de la formula SAE para la competencia, siendo la deformación máxima de 25 mm.

Vuelco.

En la simulación de vuelco, la deformación en el primer chasis de 9.81 mm y para el segundo chasis es de 9.03 mm, cumpliendo con el apartado en el reglamento de la formula SAE para la competencia, siendo la deformación máxima de 25 mm.

Optimización.

Con respecto a la optimización, se realiza el análisis sobre cuál es la mejor opción para la construcción del chasis tubular, teniendo la construcción en función de los costos para

ello se empleó el Acero SAE 4130, Acero SAE 1010 y a cero SAE 1020. Obteniendo los siguientes precios que se expresan en las tablas.:

En la tabla el precio total para producir un chasis con el material SAE 4130 es de \$529, ese precio incluye la optimización ya antes mencionada de los cinco miembros estructurales. El cambio de miembros estructurales tiene un total de 6,1 m a cambiar con un precio promedio de \$117 para optimizar con un grosor de 1.8 y 1.2 mm obteniendo un factor de seguridad en rigidez torsional de 1.58, la rigidez longitudinal 1.24 y en frenado de 1.55.

Tabla 40. Cantidad y precio de Acero SAE 4130.

CANTIDAD			
MIEMBRO ESTRUCTURAL	DIAMETRO EXT/GROSOR	\$/M	M
SECCION CIRCULAR	25,4/2,4	22	3,7
SECCION CIRCULAR	25,4/1,8	20	3,1
SECCION CIRCULAR	25,4/1,6	18	12,5
SECCION CIRCULAR	25,4/1,2	15	10,7

PRECIO TOTAL	
MIEMBRO ESTRUCTURAL	PRECIO TOTAL
SECCION CIRCULAR	81,4
SECCION CIRCULAR	62
SECCION CIRCULAR	225

SECCION CIRCULAR	160,5
TOTAL	528,9

El segundo material se trata de acero SAE 1010, el precio para la producción total del chasis es de \$288 este precio incluye las optimizaciones antes planteadas, cabe mencionar que este es el material produce un menor coeficiente de seguridad en las tres pruebas dinámicas realizadas. Este material está como última opción debido a su bajo coeficiente seguridad en las pruebas realizadas en donde si hablamos de rigidez torsional llega a un coeficiente seguridad de 1.12, si hablamos de rigidez longitudinal llega a un coeficiente de seguridad de 1.15 y de frenado llega a un coeficiente de seguridad de 1.08

Tabla 41. Cantidad y precio de Acero SAE 1010.

CANTIDAD			
MIEMBRO ESTRUCTURAL	DIAMETRO EXT/GROSOR	\$/M	M
SECCION CIRCULAR	25,4/2,4	12	3,7
SECCION CIRCULAR	25,4/1,8	11	2,1
SECCION CIRCULAR	25,4/1,6	10	12,5
SECCION CIRCULAR	25,4/1,2	8	12

PRECIO TOTAL	
MIEMBRO ESTRUCTURAL	PRECIO TOTAL
SECCION CIRCULAR	44,4
SECCION CIRCULAR	23,1
SECCION CIRCULAR	125
SECCION CIRCULAR	96
TOTAL	288,5

Como tercera alternativa tenemos la aplicación del acero SAE 1020, la construcción total del chasis de fórmula SAE tiene un precio de estimado de \$323 incluyendo las modificaciones antes mencionadas. Este material nos ofrece coeficientes de seguridad muy buenos a comparación del anterior en las pruebas como rigidez torsional arrojó valores de 1.40, en rigidez longitudinal 1.44 y en frenado 1.43.

Tabla 42. Cantidad y precio de Acero SAE 1020.

CANTIDAD			
MIEMBRO ESTRUCTURAL	DIAMETRO EXT/GROSOR	\$/M	M
SECCION CIRCULAR	25,4/2,4	14	3,7
SECCION CIRCULAR	25,4/1,8	12	2,1
SECCION CIRCULAR	25,4/1,6	11	12,5

SECCION CIRCULAR	25,4/1,2	9	12
---------------------	----------	---	----

PRECIO TOTAL	
MIEMBRO ESTRUCTURAL	PRECIO TOTAL
SECCION CIRCULAR	51,8
SECCION CIRCULAR	25,2
SECCION CIRCULAR	137,5
SECCION CIRCULAR	108
TOTAL	322,5

El análisis permite descartar un material para emplearse que viene siendo el acero SAE 1010, ya que es el que menor coeficiente seguridad posee, sin embargo, existe dos materiales que me proporcionan un coeficiente seguridad muy llamativo el acero SAE 4130 y 1020. El coeficiente de seguridad de las cero a 4130 es mucho mayor en comparación al cero 10 10 pero su precio es muy elevado dando una diferencia en construcción total del chasis de aproximadamente \$205. El análisis final sobre cuál material elegir para la reconstrucción de chasis depende de la cantidad de recursos que se puede emplear en dicho proyecto, en el ámbito de resistencia de materiales el coeficiente de seguridad nos dice que la acero SAE 4130 es el apropiado para la construcción del chasis tubular.

7. Conclusiones.

- Con la culminación de este proyecto, se ha logrado cumplir el objetivo general planteado, que consistió en analizar el impacto de las cargas dinámicas y estáticas que actúan sobre el chasis del modelo EB17. Esto se alcanzó mediante una exhaustiva investigación del reglamento aplicable, la propuesta de una metodología de medición alternativa a las tradicionales y la implementación de herramientas avanzadas de diseño y análisis, como el software CAD-CAE.
- El marco normativo empleado en la construcción del Formula SAE EB17 resultó fundamental, ya que estableció un punto de partida clave al definir las restricciones de diseño, las especificaciones relacionadas con las cargas aplicadas y los parámetros necesarios para garantizar la seguridad, funcionalidad y cumplimiento con los estándares internacionales de la competencia.
- Dada la geometría de los miembros estructurales (Tubos de sección circular), la dificultad para medir fue una barrera para el avance del proyecto, pero dadas las habilidades en temas de diseño se creó un sistema que me permita establecer mediante subestructuras medidas claves para el diseño de en un software CAD, determinando que dicha estructura medida contaba con deformaciones debido al uso, mal diseño o dimensionamiento de miembros estructurales.
- El análisis mediante elementos finitos de la estructura original demostró que no está apta para el aumento de peso, dando un bajo coeficiente de seguridad en 3 de las 4 pruebas dinámicas. Sin embargo, mediante el ajuste de la estructura volviendo a su estado original, es decir, sin ninguna deformación se consiguieron resultados favorables demostrando un buen coeficiente de seguridad en las 4 pruebas.

8. Recomendaciones.

- Debido a que, el monoplaza EB17 fue construido en el año 2018, es indispensable revisar el reglamento actualizado para evidenciar si existe o no cambio en el reglamento, proceder con la actualización y corregir si es necesario.
- La medición del chasis tubular debe realizarse en un mismo horario, misma temperatura y misma cantidad de horas destinadas para reducir el porcentaje de variación.
- El diseño en el software CAD es complicado si se hiciera en un plano 2D, para ello se emplea el diseño en un plano 3D del chasis reduciendo considerablemente el tiempo.
- Una vez obtenido el boceto 3D, se recomienda realizar un ensamblaje para luego insertar estructura de sección tubular.
- Al momento de recortar, realizar muescas o biseles en el ensamblaje se recomienda realizarlo de manera coordinada, relacionando un máximo de 3 elementos para evitar errores.
- Se recomienda que, al utilizar la interfaz CAD del software CAE, se evite convertir cada miembro tubular a superficie de forma individual. Debido que, al realizar muescas, biseles o recortes, es importante relacionar los miembros entre sí, integrándolos en una única entidad continua con los tubos de sección circular que contengan dichas modificaciones. Esto garantizará convertir el sólido del componente en superficie de manera rápida.

9. Bibliografía.

- Betancur Rodríguez, M. A. (2011). *Ingeniería inversa aplicada: metodología y aplicaciones industriales* (Bachelor's thesis, Universidad EAFIT).
- Montesdeoca Montesdeoca, R. J., & Zeas Nieto, P. A. (2022). *Análisis de las prestaciones estructurales de un chasis vehicular tubular de un vehículo eléctrico Bi-Plaza* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Mejías Rodríguez, A., & Toranzo Lorca, G. (2015). *Herramienta de diseño conceptual basado en bocetos a mano alzada para el software GALBA-CAD* (Bachelor's thesis).
- Castillo, J., & Gómez, M. (2020). *Rediseño en ingeniería: teoría y práctica*. Editorial Universitaria.
- Ríos, M. E. M., Golondrino, G. E. C., & Alarcón, M. A. O. (2022). Desarrollo de habilidades técnicas en ingeniería de software aplicando ingeniería inversa. *Revista Boletín Redipe*, 11(1), 534-550.
- Römer, C., & Schilling, A. (2021). *Application of photogrammetry for 3D modeling in automotive engineering*. *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(2), 1151-1164. <https://doi.org/10.1007/s00766-021-00364-8>
- Aydın, M., & Yıldırım, H. (2020). Measurement techniques in manufacturing processes: Challenges and solutions. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.05.004>
- Arcos, G. M. C., Palacio, S. M., Santamaría, S. I. S., & Yanzapanta, Á. G. M. (2021). Importancia de los sistemas CAD-CAM para el desarrollo de proyecto de conformado de materiales. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 6(11), 370-382.
- Suárez, J. C., Salazar, F. F., Nava, I. F., & Hernández, R. H. (2019). Industria 4.0 y manufactura digital: un método de diseño aplicando ingeniería inversa. *Ingeniería*, 24(1), 6-28.

- Freire Bravo, J. J. (2021). Manufactura de un cabezote de un prototipo de motor de dos tiempos mono cilíndrico 100cc aplicando ingeniería inversa y el método CAD/CAM.
- Villarreal Bolaños, C. A. (2019). Alternativa para la construcción de autopartes vehicular por medio de la ingeniería inversa e impresión 3D. Caso de estudio tapa de distribución inferior del Chevrolet Spark 2015.
- Jiménez, J. C. D., Pérez, L. R. V., & Leal, J. F. V. (2024). Metrología industrial en la industria automotriz: identificación de problemáticas en Querétaro, México. *Brazilian Journal of Development*, 10(9), e72972-e72972.
- Acosta Portilla, D. J. (2022). *Análisis de la influencia del modelado de losas por elementos tipo shell y membrana en el diseño estructural de un edificio de 4 pisos, utilizando un software de diseño especializado* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil).
- Baker, D. A. B. M. (2015). *FSAE CHASSIS Final Progress Report*. University of Delaware.
- Singh, R. P. (2010). *STRUCTURAL PERFORMANCE ANALYSIS OF FORMULA SAE CAR*.
- Riley, W., & George, A. (2002). 2002-01-3300 Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis. <https://doi.org/10.4271/2002-01-3300>
- Torres, E. L. V. (2013). SAE 1020 Y SAE 1045. Universidad Libre. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/7826/VasquezTorresEdwinLibardo2013Anexos.pdf?sequence=2>
- Santos, S. (2024). Avaliação de Métodos Multiaxiais e Clássicos na Previsão de Vida à Fadiga: Estudos em Ligas AISI/SAE 4130 e Al 2024-T3 [Disertación de maestría]. <http://www.realp.u.br/js/identificador/10482/50641>

Cuenca Ramón, H. S., & Jara Romero, K. A. (2022). *Optimización de peso estructural para un chasis monoplaza Formula Student EB17 de la carrera Ingeniería Automotriz UPS sede Cuenca* (Bachelor's thesis).