

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**Diseño y análisis estático de un marco de triciclo delta con material
compuesto PRFV para reducir su masa**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

Julio Cesar Murgueytio Zapata

ASESOR

Elmer Rolando Polo Briceño

<https://orcid.org/0000-0002-5831-8818>

Chiclayo, 2023

**Diseño y análisis estático de un marco de triciclo delta con
material compuesto PRFV para reducir su masa**

PRESENTADA POR

Julio Cesar Murgueytio Zapata

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR

Alejandro Segundo Vera Lázaro

PRESIDENTE

Lucio Antonio Llontop Mendoza

SECRETARIO

Elmer Rolando Polo Briceño

VOCAL

Dedicatoria

A quienes me inspiraron, ayudaron y apoyaron. A mis padres, tía y hermana, por haber creído en mí, brindándome ejemplo de superación y sacrificio; enseñándome a valorar el esfuerzo y perseverancia de cada logro. Por el apoyo incondicional en mi formación personal y profesional, por estar a mi lado en todo momento, motivando a alcanzar las metas propuestas, con integridad y respeto

Agradecimientos

A Dios y a la Virgen, como guías de camino, de superación y fortaleza ante los retos presentes.

A mi asesor, Ing. Elmer Polo, por el apoyo y enseñanzas en la materia, por la confianza y ánimos en cada asesoría brindada para el desarrollo de la presente tesis.

A mi familia y amigos, cuyas palabras de aliento, demostraron en mí, inspiración y dedicación.

Tesis final

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	pirhua.udep.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	Deyby Huamanchahua, Jhon O. Arce-Cadillo. "Development of Exoskeleton Adjustable to Peruvian Anthropometry for the Rehabilitation of the Upper Right Limb in Patients with Joint Mobility Deficit", 2022 IEEE 13th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), 2022 Publicación	<1%
5	core.ac.uk Fuente de Internet	<1%
6	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1%

Índice

Resumen.....	10
Abstract.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN	14
1.3. OBJETIVOS.....	15
II. MARCO TEÓRICO	16
2.1. MARCO DE REFERENCIAS DEL PROBLEMA.....	16
2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS	17
2.2.1. ANÁLISIS MECÁNICO – ESTÁTICO ESTRUCTURAL.....	17
<input type="checkbox"/> Esfuerzo axial	17
<input type="checkbox"/> Esfuerzo cortante.....	18
<input type="checkbox"/> Esfuerzo por torsión.....	19
<input type="checkbox"/> Factor de seguridad.....	20
<input type="checkbox"/> Diagrama de esfuerzo y deformación	20
<input type="checkbox"/> Centro de gravedad.....	21
<input type="checkbox"/> Sistema de transmisión	21
<input type="checkbox"/> Diagrama de cuerpo libre estático - cinético.....	21
2.2.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	21
III. MARCO METODOLÓGICO.....	22
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	22
3.1.1. ENFOQUE	22
3.1.2. TIPO.....	23
3.1.3. NIVEL	23
3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	23
3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	23
3.4. CRITERIOS DE SELECCIÓN	23
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	23
3.6. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	24
3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	24
3.8. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	25
3.9. MATRIZ DE CONSISTENCIA	26
IV. RESULTADOS.....	27
Ventajas de diseño de un vehículo de potencia humana – triciclo delta.....	27
Concepto y consideraciones.....	32
Ergonomía, antropometría y su relación con la producción de potencia.....	37
Distribución de piezas y elementos	44

Antropometría y tallaje	44
Inclinación del ángulo del asiento, línea horizontal y respaldar	49
Modelado en software	52
Análisis estático	57
Materiales a utilizar	58
Análisis teórico de cargas y esfuerzos sobre el chasis	60
Simulación análisis estático	70
Comparación con materiales actuales	80
Incidencia de la reducción de masa sobre la resistencia estructural del marco del vehículo.....	90
V. CONCLUSIONES.....	95
VI. RECOMENDACIONES.....	97
Referencias.....	98
ANEXOS	102
Anexo 1.....	102
Anexo 2.....	103
Anexo 3.....	104
Anexo 4.....	105

Lista de figuras

FIG. 1: REPRESENTACIÓN DE ESFUERZO AXIAL SOBRE UN PRISMA MECÁNICO [11, p. 38]	18
FIG. 2: REPRESENTACIÓN DE ESFUERZO CORTANTE SIMPLE SOBRE UN PERNO [11, p. 10]	18
FIG. 3: REPRESENTACIÓN DE ESFUERZO CORTANTE DOBLE SOBRE UN PERNO [11, p. 11]	19
FIG. 4: REPRESENTACIÓN DE ESFUERZO POR TORSIÓN EN UN EJE CIRCULAR [11, pp. 138 - 139]	19
FIG. 5: DIAGRAMA DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN [11, p. 55]	20
FIG. 6: DIAGRAMA DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN [12, p. 110]	21
FIG. 7: HPV TRICICLO ESTILO DELTA [15]	22
FIG. 8: VISTAS ISOMETRICAS DEL BOSQUEJO A DE UN TRICICLO DELTA	34
FIG. 9: PIEZAS PRINCIPALES DEL BOSQUEJO A	35
FIG. 10: VISTAS ISOMETRICAS DEL BOSQUEJO B DE UN TRICICLO DELTA	36
FIG. 11: PIEZAS PRINCIPALES DEL BOSQUEJO B	37
FIG. 12: EFECTO DE ACELERACIÓN DE DIFERENTES VPH – VELOCIDAD VS ÁREA FRONTAL EFECTIVA [25, p. 149]	38
FIG. 13: REPRESENTACION DEL ANGULO DEL ASIENTO EN UNA BICICLETA VERTICAL [28]	42
FIG. 14: MODELO MECANICO Y ANÁLISIS CINEMÁTICO DE UN SISTEMA DE CICLISMO VERTICAL. (HA- HIP ANGLE; KA- KNEE ANGLE; AA- ANKLE ANGLE) [29, p. 62]	42
FIG. 15: ONDAS SINUSOIDALES DESARROLLADAS POR EL ÁNGULO DE LA BIELA Y LA FLEXION DE LA CADERA Y LA RODILLA [29, p. 63].	43
FIG. 16: COMPARATIVA EN MÁXIMO EJERCICIO ENTRE CICLISMO RECLINADO Y VERTICAL [30, p. 42].	43
FIG. 17: MODELO CINEMÁTICO DE UNA PERSONA EN UN SISTEMA DE CICLISMO RECLINADO	44
FIG. 18: PARÁMETROS ANTROPOMÉTRICOS [31, p. 234]	45
FIG. 19: MODELO CINEMÁTICO DE UNA PERSONA EN UN SISTEMA DE CICLISMO RECLINADO CON LA UBICACIÓN DE LONGITUDES EN EL PLANO SAGITAL, ADAPTADO DEL MODELO “MUÑECO DE PRUEBAS” DE FERNANDO SANTOS [35].	47
FIG. 20: CURVA CON AJUSTE DE LA RELACIÓN DE ÁNGULOS DEL ASIENTO Y LA POTENCIA DE SALIDA EN WATTS	50
FIG. 21: RELACIÓN ENTRE EL RANGO DE ÁNGULOS DE ASIENTO Y POTENCIA DE SALIDA	50
FIG. 22: AUMENTO A LA CURVA DE ÁNGULOS DE ASIENTO Y POTENCIA DE SALIDA	51
FIG. 23: CURVA DE LA RELACIÓN DE LA INCLINACIÓN DEL ASIENTO Y EL TIEMPO DE CICLISMO	51
FIG. 24: ACOTACIONES EN MM Y LÍNEAS GUÍA PARA EL MODELO DEL MARCO	53
FIG. 25: CONCEPTO DE MODELADO CAD	53
FIG. 26: VISTA DEL PERFIL RECTANGULAR DEL MARCO	54
FIG. 27: VISTA DEL PERFIL CIRCULAR DEL TUBO GUÍA	54
FIG. 28: VISTA EXPLOSIONADA CON SUBSISTEMAS	55
FIG. 29: VISTA EXPLOSIONADA INCLUYENDO LA TOTALIDAD DEL MARCO	55
FIG. 30: REPRESENTACIÓN ISOMÉTRICA COLOREADA CAD	56
FIG. 31: REPRESENTACIÓN RENDERIZADA ISOMÉTRICA CAD	56
FIG. 32: REPRESENTACIÓN EN VISTA LATERAL CAD	57
FIG. 33: PLANTEAMIENTO DE CARGAS EN EL SISTEMA	61
FIG. 34: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA	62
FIG. 35: PLANTEAMIENTO DE CARGAS EN SEGMENTO ABC DEL CHASIS	63
FIG. 36: DESCOMPOSICIÓN DE FUERZAS EN EL PUNTO C	63
FIG. 37: DESCOMPOSICIÓN DE FUERZAS EN EL PUNTO D	66
FIG. 38: PLANTEAMIENTO DE CARGAS Y DISTANCIAS EN SEGMENTO RK-RR-RO DEL CHASIS	68
FIG. 39: NUMERACIÓN DE PARTES QUE CONFORMAN EL HPV	70
FIG. 40: VISTA EXPLOSIONADA DE LAS PARTES DE LA ESTRUCTURA A ANALIZAR	72
FIG. 41: MALLADO BASADO EN CURVATURA DE COMBINADO	73
FIG. 42: REPRESENTACIÓN Y GRÁFICA DE ESFUERZOS CON CARGA DE FUERZA DE GRAVEDAD AL MARCO EN MATERIAL PRFV	74
FIG. 43: PUNTO EN DONDE SE HA APLICADO EL MÁXIMO ESFUERZO CON CARGA DE FUERZA DE GRAVEDAD AL MARCO EN MATERIAL PRFV	74
FIG. 44: TENSIONES NORMALES RESPECTO AL EJE Y CON CARGA DE FUERZA DE GRAVEDAD AL MARCO EN MATERIAL PRFV	75

FIG. 45: DESPLAZAMIENTO EN MILÍMETROS DE LA ESTRUCTURA APLICANDO CARGA DE FUERZA DE GRAVEDAD AL MARCO EN MATERIAL PRFV	75
FIG. 46: GRAFICA Y REPRESENTACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD APLICANDO CARGA DE FUERZA DE GRAVEDAD AL MARCO EN MATERIAL PRFV	76
FIG. 47: LUGAR DE APLICACIÓN DE LAS CARGAS.....	77
FIG. 48: REPRESENTACIÓN Y GRÁFICA DE ESFUERZOS CON MATERIAL PRFV	77
FIG. 49: ESFUERZOS SOBRE EL MIEMBRO ESTRUCTURAL – TUBO GUÍA DEL TIMÓN Y HORQUILLA.....	78
FIG. 50: PUNTO EN DONDE SE HA APLICADO EL MÁXIMO ESFUERZO	78
FIG. 51: DESPLAZAMIENTO EN MILÍMETROS DE LA ESTRUCTURA CON PRFV	79
FIG. 52: GRAFICA Y REPRESENTACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD APLICADO AL ENSAMBLAJE.....	79
FIG. 53: REPRESENTACIÓN Y GRÁFICA DE ESFUERZOS CON MATERIAL DE FIBRA DE CARBONO.....	81
FIG. 54: ESFUERZOS SOBRE EL MIEMBRO ESTRUCTURAL – SOPORTE DONDE SE UBICARÁN LOS AMORTIGUADORES DE FIBRA DE CARBONO	81
FIG. 55: DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA CON MATERIAL DE FIBRA DE CARBONO.....	82
FIG. 56: FACTOR DE SEGURIDAD DEL MARCO CON FIBRA DE CARBONO LAMINADA 45°	82
FIG. 57: ESFUERZO DESARROLLADO SOBRE LA ESTRUCTURA CON ALUMINIO 6061 T6	83
FIG. 58: ESFUERZOS SOBRE EL MIEMBRO ESTRUCTURAL CON ALUMINIO 6061 T6.....	84
FIG. 59: DESPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA CON MATERIAL ALUMINIO 6061 T6.....	84
FIG. 60: FACTOR DE SEGURIDAD DEL MARCO CON ALUMINIO 6061 T6	85
FIG. 61: ESFUERZOS APLICADOS SOBRE LA ESTRUCTURA CON ALUMINIO 7075 T6.....	86
FIG. 62: ESFUERZOS SOBRE EL MIEMBRO ESTRUCTURAL CON ALUMINIO 7075 T6.....	86
FIG. 63: DESPLAZAMIENTO DE LA ESTRUCTURA CON MATERIAL ALUMINIO 7075 T6.....	87
FIG. 64: FACTOR DE SEGURIDAD DEL MARCO CON ALUMINIO 7075 T6	87
FIG. 65: ESFUERZOS DESARROLLADOS CON MATERIAL ACERO CROMOLY	88
FIG. 66: ESFUERZOS SOBRE EL MIEMBRO ESTRUCTURAL CON ACERO CROMOLY	89
FIG. 67: DESPLAZAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA CON MATERIAL DE ACERO CROMOLY	89
FIG. 68: FACTOR DE SEGURIDAD DEL MARCO CON ACERO CROMOLY.....	90

Lista de Gráficos

GRÁFICO 1: COMPARATIVA DE DENSIDADES DE LOS MATERIALES CONSIDERADOS.....	91
GRÁFICO 2: COMPARATIVA DE MASAS EN EL CUADRO DEL VEHÍCULO.	91
GRÁFICO 3: COMPARATIVA DEL LÍMITE ELÁSTICO DE LOS MATERIALES CONSIDERADOS.	91
GRÁFICO 4: COMPARATIVA DE ESFUERZOS EN EL CUADRO DEL VEHÍCULO.	92
GRÁFICO 5: COMPARATIVA DE FACTORES DE SEGURIDAD EN EL CUADRO DEL VEHÍCULO.....	92
GRÁFICO 6: COMPARATIVA DE DESPLAZAMIENTOS EN EL CUADRO DEL VEHÍCULO.....	92
GRÁFICO 7: COMPARATIVA DE PRECIO DE LOS MATERIALES CONSIDERADOS.....	93

Lista de tablas

TABLA 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA	26
TABLA 2: MATRIZ DE IMPORTANCIA	27
TABLA 3: MATRIZ DE IMPORTANCIA SOBRE LAS NECESIDADES	28
TABLA 4: MATRIZ DE VALORES Y UNIDADES MÉTRICAS.....	28
TABLA 5: MATRIZ DE NECESIDADES - MÉTRICAS	29
TABLA 6: MATRIZ MORFOLÓGICA	30
TABLA 7: COMPARATIVA DINÁMICA DE VEHÍCULOS CON ESTILO RECLINADO	40
TABLA 8: RELACIÓN ENTRE LOS ÁNGULOS DE LAS ARTICULACIONES Y LA POTENCIA GENERADA.....	41
TABLA 9: MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS	46
TABLA 10: DATOS ANTROPOMÉTRICOS	48
TABLA 11: DATOS ANTROPOMÉTRICOS EN CM	49
TABLA 12: RELACIÓN ENTRE EL RANGO DE ÁNGULOS DEL ASIENTO, LA POTENCIA DE SALIDA Y EL TIEMPO DE CICLISMO.....	52
TABLA 13: PROPIEDADES DEL MATERIAL FUNDICIÓN DE RESINA POLIÉSTER RÍGIDA	58
TABLA 14: PROPIEDADES DEL MATERIAL FIBRA DE VIDRIO DE GRADO S	59

TABLA 15: PROPIEDADES DEL MATERIAL SINTETIZADO	59
TABLA 16: REGISTRO DEL MATERIAL Y CONFIGURACIÓN.....	60
TABLA 17: DATOS DE MASA EN DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL CUERPO HUMANO.....	61
TABLA 18: COMPONENTES UTILIZADOS EN EL SISTEMA Y SUS MASAS	70
TABLA 19: PARÁMETROS DE MALLADO.....	72
TABLA 20: FUERZAS ESTABLECIDAS EN EL VEHÍCULO.....	76
TABLA 21: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO [46]	80
TABLA 22: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO 6061 T6 [46].....	83
TABLA 23: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO 7075 T6 [46].....	85
TABLA 24: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 4130 [46].....	88
TABLA 25: RESUMEN DE MATERIALES Y SUS RESULTADOS	94

Resumen

Los vehículos de tracción humana presentan una tendencia creciente debido a su alta demanda en el ámbito profesional como recreativo. Un criterio importante para el usuario es preferir vehículos de construcción ligera, factor relacionado a la masa, por ende, al material de fabricación. Por ello, los materiales compuestos actualmente se presentan como una alternativa en los vehículos de potencia humana, frente a los materiales utilizados actualmente; por tanto, el estudio desarrollado es acerca del componente de cuadro o marco de un vehículo no profesional impulsado por tracción humana estilo delta (HPV – Human Powered Vehicle). Este marco ha sido analizado con la matriz de un material compuesto liviano, constituido por la combinación de dos materiales de propiedades químicas y mecánicas diferentes, siendo en este caso, la matriz de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV). Sintetizada mediante el software CES EduPack la matriz isotrópica lineal se configura bajo 7 capas intercaladas entre “Fundición de resina poliéster rígida” de 0,25 mm (capa impar) y “Fibra de vidrio grado S” de 3,00 mm (capa par). Mediante el software SOLIDWORKS, se emplearon las nuevas propiedades mecánicas obtenidas para realizar un análisis estático aplicando las cargas distribuidas en la estructura del marco, comprobando que la relación entre densidad ($2,36 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), masa (12,1246 kg) y soporte de esfuerzos es óptima en el desarrollo para la aplicación pertinente, pues se registró un esfuerzo máximo de 29,746 MPa sobre el límite elástico de 971,5 MPa; considerándose como una alternativa viable liviana de material compuesto.

Palabras claves: Vehículo de potencia humana, análisis estático estructural, materiales compuestos, masa, poliéster reforzado por fibra de vidrio, antropometría.

Abstract

Human-powered vehicles present an increasing tendency due to their high request in the professional as well as recreational sector. An important criterion for the user is to have a preference for vehicles of lightweight construction, a factor related to the mass, ergo, to the material of manufacture. Therefore, composite materials are currently presented as an alternative in human-powered vehicles, in comparison to the materials currently used; therefore, the study developed is about the frame component of a non-professional human powered vehicle delta style (HPV – delta style). This frame has been analyzed with the matrix of a composite material constituted by the combination of two materials with different chemical and mechanical properties, in this case, the matrix of Fiberglass Reinforced Polyester (FRP). Synthesized using CES EduPack software, the linear isotropic matrix is configured under 7 layers between "Rigid polyester resin casting" of 0,25 mm (odd layer) and "S grade fiberglass" of 3,00 mm (even layer). Using SOLIDWORKS software, the new mechanical properties obtained were used to perform a static analysis applying the distributed loads on the frame structure, proving that the relationship between density ($2,36 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), mass (12,1246 kg) and stress support is optimal in the development for the relevant application, since a maximum stress of 29,746 MPa over the elastic limit of 971,5 MPa was recorded; being considered as a viable alternative composite material.

Keywords: Human-powered vehicle, static structural analysis, composite materials, mass, Fiberglass Reinforced Polyester, anthropometry

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al Informe Mundial de Calidad del Aire 2022, Perú se ubica dentro de los 40 países con mayor contaminación ambiental, según la concentración de partículas en la atmosfera PM 2,5. Siendo la principal causa, la polución producida por los gases emitidos por efectos de la combustión debido a la gran congestión vehicular [1]. Informa el Sistema Nacional de Información Ambiental del Perú; en el año 2016, por cada 1000 habitantes existen 1075 vehículos motorizados [2].

Una de las alternativas de movilización sostenible desarrolladas es el uso de la bicicleta; no obstante, en Lima el 86,9% de su población transita en vehículos motorizados; 12% a pie; y solo el 1,1% en bicicleta; porcentaje creciente con la construcción de nuevas ciclovías [3]. Y es en comparación con Copenhague, pues, el 62% de su población se desplaza utilizando este vehículo, con el motivo de disminuir su huella de carbono [4].

La expansión de los vehículos de tracción (o potencia) humana ha impulsado la utilización de diversos elementos tanto metálicos, verbigracia, acero y aluminio; como no metálicos, la fibra de carbono; para su proceso de construcción. A fin de plantear una alternativa de material, se ha sintetizado la composición de materiales no metálicos, Resina poliéster y Fibra de vidrio, implicando mejoras en las propiedades mecánicas respecto a los materiales actualmente empleados.

El objetivo del proyecto fue diseñar un cuadro de un vehículo de tracción humana con material compuesto de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV), para reducir la masa en comparación a los materiales aplicados actualmente. Teniendo en cuenta que, la resina poliéster es un material versátil, con buen desempeño y alta resistencia al ambiente [5]; y la fibra de vidrio tipo S, puede ser usada como composite en vehículos y piezas reforzadas [6].

Este sistema ha sido basado en el modelo triciclo delta, el cual se presenta con dos ruedas traseras y una delantera, controlado por una sola persona en posición semihorizontal, con tracción trasera, accionado por el mecanismo cadena – piñón; asimismo posee un sistema de inclinación y amortiguación en la parte posterior.

Asimismo, se realizó el análisis estático para verificar las propiedades mecánicas, características y comportamiento del mecanismo; comprendan un correcto

funcionamiento bajo la carga y esfuerzo definida por un individuo promedio, definiendo una adecuada estabilidad, seguridad y practicidad de manejo.

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿La reducción de masa atribuible al uso de un material compuesto de baja densidad influye sobre la resistencia estructural de un marco de vehículo de tracción humana en comparación a otros materiales?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La justificación de diseño y análisis mecánico se resolverá en los siguientes apartados:

- **SOCIAL:** El diseño y forma del cuadro planteado desarrolla una posición, semihorizontal, más relajada del cuerpo; beneficiando a personas que deseen usar una alternativa de movilidad a pedales; guardando una mayor estabilidad por contar con tres ruedas, generando mayor seguridad y confianza al usuario.
- **ECONÓMICO:** El valor de producción del material sintetizado, si bien es mayor que los metales comerciales, como el acero y el aluminio; es de menor precio que otros tipos de compuestos como la fibra de carbono; materiales utilizados en esta aplicación. Así mismo, en el modelado general del vehículo se han usado piezas, componentes y medidas con referencia a perfiles comerciales, lo que permitirá un mantenimiento no costoso.
- **AMBIENTAL:** Con el uso de vehículos a tracción humana, la huella de carbono y de gases contaminantes producidos por el parque automotor se verán reducidos, minimizando los efectos perjudiciales al medio ambiente.
- **TECNOLÓGICO:** El marco o cuadro, de un vehículo de tracción humana estilo delta, propuesto; se define por la síntesis de un material compuesto, el cual combina las propiedades químicas y mecánicas de la resina poliéster y la fibra de vidrio o PRFV, desarrollando un marco flexible y resistente a la tracción, presentando una baja densidad, por ende, ligero; además de soportar la carga aplicada (de una persona). Asimismo, se plantea el desarrollo de patente por la morfología original bajo el concepto de modelo de utilidad; combinando la innovación de propuesta de concepto y ergonomía; ofreciendo una alternativa de vehículo eficiente ambientalmente.

1.3. OBJETIVOS

- **OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y analizar estáticamente el marco de un vehículo de tracción humana, de material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S - para reducir la masa.

- **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Evaluar el modelo triciclo delta considerando sus ventajas de diseño.
2. Realizar el modelo conceptual del vehículo de tracción humana y transmisión de potencia mediante mecanismo cadena – piñón.
3. Diseñar un marco de vehículo de potencia humana ligero mediante perfiles y medidas estandarizados, empleando el material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S, en el software CAD/CAE SOLIDWORKS.
4. Calcular y simular el marco de manera estática utilizando el material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S, mediante el software CAD/CAE.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO DE REFERENCIAS DEL PROBLEMA

a) A. Whitman [7] presenta en esta tesis una guía de diseño de un vehículo de tracción humana, desde un punto de vista sistemático para una competencia desarrollada por ASME, con el objetivo de plantear un tipo de movilidad asequible para las personas comunes, estableciendo variables establecidas como el confort y utilidad; desarrollando el aspecto conceptual y sus detalles de planificación para el diseño y construcción; teniendo en cuenta simulaciones, modelado, prototipo y pruebas.

Concluyendo en su totalidad mediante el diseño de la idea planteada, desarrollando simulaciones mediante software, y pruebas de campo. Brindando también observaciones a tener en cuenta en trabajos futuros y su realización.

b) A. Dalal [8] en este trabajo de investigación plantea un vehículo impulsado únicamente a pedales, el cual debe ser liviano, compacto, ergonómico y fácil de manejar, dirigido a un público joven – adulto, con la finalidad de promover el uso de vehículos sostenibles, en vez de los típicos móviles impulsados por combustibles fósiles; estableciendo hábitos de buena salud y movilidad muscular.

Este producto se ha desarrollado teniendo en cuenta múltiples iteraciones de diseño, utilizando la matriz morfológica de SOLIDWORKS; y mejoras que permiten que sea comercializable en este ámbito, y adecuado para el uso diario.

c) A. Fisher *et al* [9] presentan un documento el cual examina el diseño, análisis, fabricación y pruebas del vehículo One - Ride que participó en la competencia ASME West Coast HPVC 2015; cuyo objetivo es el de atraer a las personas y cambiar su modo de movilización; estos vehículos pueden ser diseñados para ser ajustables a cualquier tamaño de altura sin ejercer una fatiga constante.

Este vehículo fue redefinido y analizado en SOLIDWORKS; posteriormente construido de acuerdo a las especificaciones planteadas cumpliendo protocolos de seguridad física; no obstante, presentó dos problemas respecto al balanceo de las ruedas, de inclinación en una articulación y de estabilidad a baja velocidad.

Solucionando ambas situaciones durante el proceso de reconstrucción como el cambio de la pieza; y el segundo, con la adición de una rueda guía.

d) Y. R. Yashas. *et al* [10] describen una visión general de los materiales compuestos y la necesidad de mejora de propiedades mecánicas, considerando factores como la resistencia, rigidez, densidad, costos y sostenibilidad, respecto de los materiales y recursos actuales como los metales utilizados en diversas industrias.

De acuerdo a la línea de investigación, el uso de un material termoestable, el cual es aquel polímero obtenido por un endurecimiento o curado irreversiblemente del fluido inicial mediante la aplicación de calor, o mezcla con un catalizador; siendo la resina Poliéster la base de la mezcla o sintetizado de la composición. Es en unión con alguna fibra natural o sintética que se obtienen propiedades mecánicas similares o mejores que otros materiales.

2.2. BASES TEÓRICAS CIENTÍFICAS

2.2.1. ANÁLISIS MECÁNICO – ESTÁTICO ESTRUCTURAL

Desarrolla el cálculo de esfuerzos, desplazamientos, deformaciones determinadas por cargas aplicadas sobre un cuerpo que se encuentra en reposo o su aceleración es cero.

- **Esfuerzo axial**

- También llamado esfuerzo normal, es el esfuerzo interno resultante de la sumatoria de las tensiones o cargas axiales, perpendiculares al área transversal de un prisma mecánico.

- Se representa:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

- Donde, la fuerza $P =$ Fuerza normal [Newton; libra-fuerza] aplicada sobre un área transversal de la sección A [m^2 ; $pulg^2$]; resulta en un esfuerzo axial σ [Pa; psi].

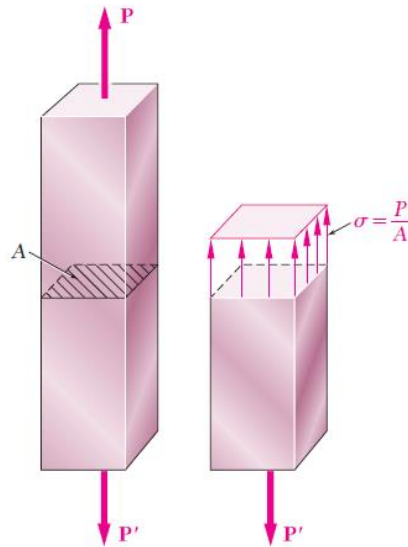


Fig. 1: Representación de esfuerzo axial sobre un prisma mecánico [11, p. 38]

- **Esfuerzo cortante**

- Esfuerzo resultante de la aplicación de fuerzas o cargas paralelas respecto a la sección transversal de un prisma mecánico. Puede darse casos en donde sea múltiple cortante: simple, doble o de área

- Se representa:

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{F/n}{A} \quad (2)$$

- Donde el esfuerzo cortante τ = [Pascal; psi]; es equivalente a una fuerza cortante P [Newton; libra-fuerza] sobre Área transversal de la sección A [m²; pulg²]. Así mismo, en caso de múltiples cortes sobre el elemento se considera una fuerza resultante F [Newton; libra-fuerza]; dividido por el número de cortes n (número de fuerzas internas).

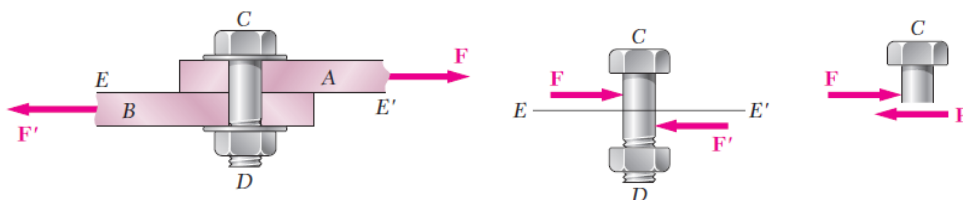


Fig. 2: Representación de esfuerzo cortante simple sobre un perno [11, p. 10]

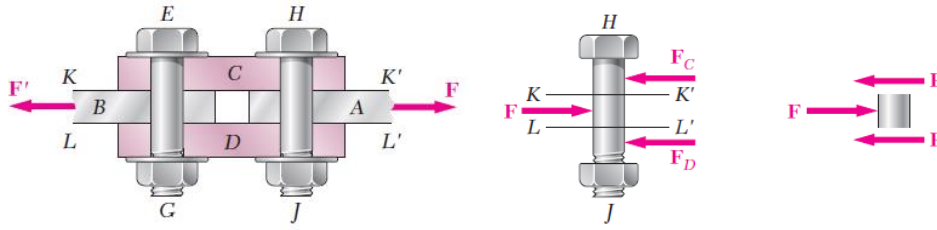


Fig. 3: Representación de esfuerzo cortante doble sobre un perno [11, p. 11]

• Esfuerzo por torsión

- Refiere a la distribución de los esfuerzos cortantes sobre un eje circular, es decir, la aplicación de un momento sobre un eje longitudinal de un prisma mecánico.

- Se representa por la teoría de Coulomb para torsión recta:

$$\tau = \frac{T}{J} \rho \quad (3)$$

- En donde *el momento torsor total* T [$N*m$; $libra*pulg$], *aplicado sobre un módulo de torsión* J [m^4 ; $pulg^4$]; *multiplicado por la distancia de centro geométrico* ρ [m ; $pulg$]; *da resultado un esfuerzo cortante* τ [$Pascal$; psi].

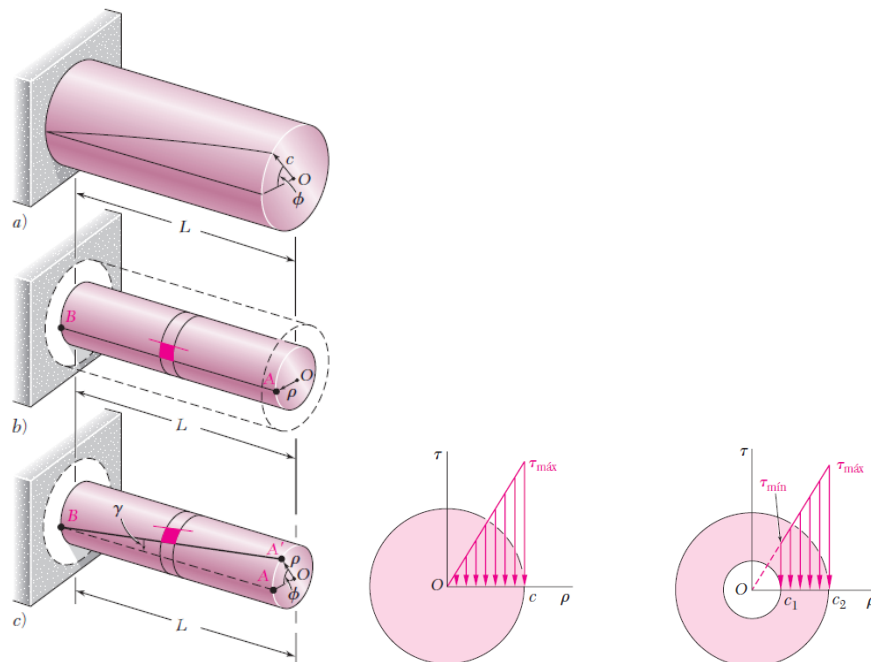


Fig. 4: Representación de esfuerzo por torsión en un eje circular [11, pp. 138 - 139]

- **Factor de seguridad**

- Coeficiente o valor obtenido de dividir la capacidad de esfuerzo de diseño y el esfuerzo permisible.

- Se representa:

$$FS = \frac{\sigma_{diseño}}{\sigma_{permisible}} \quad (4)$$

- El factor de seguridad FS , es equivalente a la división entre esfuerzo de diseño $\sigma_{diseño}$ [Pa; psi] y el esfuerzo permisible $\sigma_{permisible}$ [Pa; psi]

- **Diagrama de esfuerzo y deformación**

- Representación gráfica del comportamiento de los esfuerzos de un material sometido a una fuerza deformante.

- Se representa:

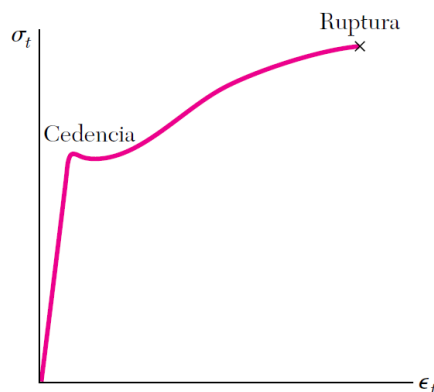


Fig. 5: Diagrama de esfuerzo y deformación [11, p. 55]

- Donde:

- Punto de cedencia o fluencia refiere a la máxima carga a la que un material se le puede aplicar y deformar de manera elástica.
- Punto de ruptura es la intersección en la cual el material presenta fracturas, y deformaciones de tipo plástico, es decir deformaciones permanentes.

- **Centro de gravedad**
 - Punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre el cuerpo, influye directamente en su estabilidad.
- **Sistema de transmisión**
 - Para vehículos pequeños como en este caso impulsados por la misma potencia humana se utilizará un sistema de catalina – piñón.
- **Diagrama de cuerpo libre estático - cinético**
 - Es la representación gráfica de las fuerzas de acuerdo a su magnitud y dirección que actúan en un cuerpo.

- Se representa:

$$\sum fx = m_i a_i \quad (5)$$

- Donde $\sum fx$ equivale a la sumatoria de fuerzas aplicadas al cuerpo [Newton; libra – fuerza]; y equivale a la multiplicación de masa de una partícula m_i [kg; libra]; y la aceleración de una partícula a_i [m/s^2 ; ft/s^2].

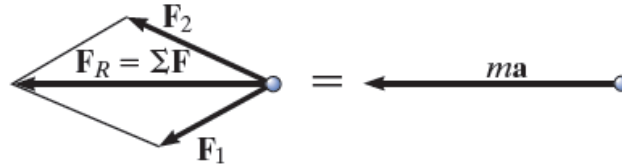


Fig. 6: Diagrama de esfuerzo y deformación [12, p. 110]

2.2.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **HUMAN POWERED VEHICLE:** (HPV) - Vehículo de Tracción Humana, móvil impulsado únicamente por fuerza muscular humana. Existiendo de diferentes categorías, sean terrestres, marítimos, aéreos [13].
- **TRICICLO ESTILO DELTA:** Este diseño se presenta con dos ruedas traseras y una delantera direccional, con un centro de gravedad bajo que proporciona seguridad y estabilidad, incluso en giros cerrados [14].



Fig. 7: HPV triciclo estilo delta [15]

- **MATERIAL COMPUESTO:** Aquellos materiales que se forman a partir de la combinación de dos o más materiales sin reaccionar químicamente y que forman nuevas propiedades y características [16].
 - **PRFV :** Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio, un material compuesto que combina las propiedades químicas y mecánicas de ambos elementos; pues la resina poliéster (o algún otro tipo) ofrece resistencia a condiciones medio ambientales y la fibra de vidrio brinda la resistencia estructural [17].
 - **FIBRA DE VIDRIO TIPO S:** Fibra compuesta por magnesio, silicato y aluminio, formulada para ofrecer una alta resistencia a la tracción; usualmente requerida en componentes reforzados y piezas aeronáuticas y vehiculares [18] , [19].
 - **RESINA POLIESTER:** Resina que cuenta con una gran flexibilidad, además de buenas propiedades mecánicas y químicas; utilizada en diferentes aplicaciones, incluyendo el compuesto PRFV [20].

III. MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. ENFOQUE

Cuantitativo. Este enfoque refiere a la utilización de datos, estos son magnitudes medibles y representables numéricamente. Los valores serán analizados sin alteración que pueda influir en los apartados siguientes, y, por tanto, las conclusiones definidas se redactarán en relación a los resultados obtenidos.

3.1.2. TIPO

El tipo de esta investigación corresponde a un carácter descriptivo debido a la utilización de información de tablas de materiales y propiedades mecánicas, así como de perfiles estandarizados para la elaboración del diseño y simulación

3.1.3. NIVEL

Comparativo, se realiza un estudio mediante una matriz morfológica y de acuerdo tablas de propiedades mecánicas se desarrollan simulaciones estructurales sobre el marco del triciclo delta.

3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El estudio e investigación presenta un diseño no experimental, puesto que no se realizará ningún modelo o prototipo además del desarrollo por software y los análisis y simulaciones adecuados.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población dirigida serán los vehículos de tracción humana terrestres de tres ruedas de modelo delta.

Y la muestra o unidad de estudio ha sido el marco del vehículo de tracción humana con chasis o marco de materiales compuestos ligeros modelo triciclo delta.

3.4. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Selección del tipo de material para el marco del vehículo de potencia humana.

- Aplicación
- Densidad (material ligero)
- Límite elástico óptimo
- Compatibilidad entre materiales
- Posibilidad de fabricación
- Tiempo de vida
- Protección contra factores ambientales

3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La técnica de recolección de datos e información es mediante el análisis de documentación.

- Revisión de manuales y fichas técnicas de HPV's existentes en el mercado mundial.
- Informes de materiales de CES EduPack.
- Investigaciones y tesis nacionales e internacionales.

3.6. PROCEDIMIENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La información partió de los modelos de vehículos de potencia humana para el desarrollo de un chasis con material liviano en comparación a los usados en el ámbito deportivo. Obteniéndose medidas e información como guía de cotas con el objetivo de plantear las primeras líneas guías del diseño.

La información de antropometría y tallaje también ha servido para las acotaciones y posicionamiento de elementos de interés y planteamiento del diseño del marco.

De acuerdo a los manuales y fichas técnicas se comprueban las propiedades de materiales, así como se utilizó la información para la elaboración de la matriz PRFV como una alternativa a los materiales comerciales y utilizados a la fecha para la fabricación de estos vehículos.

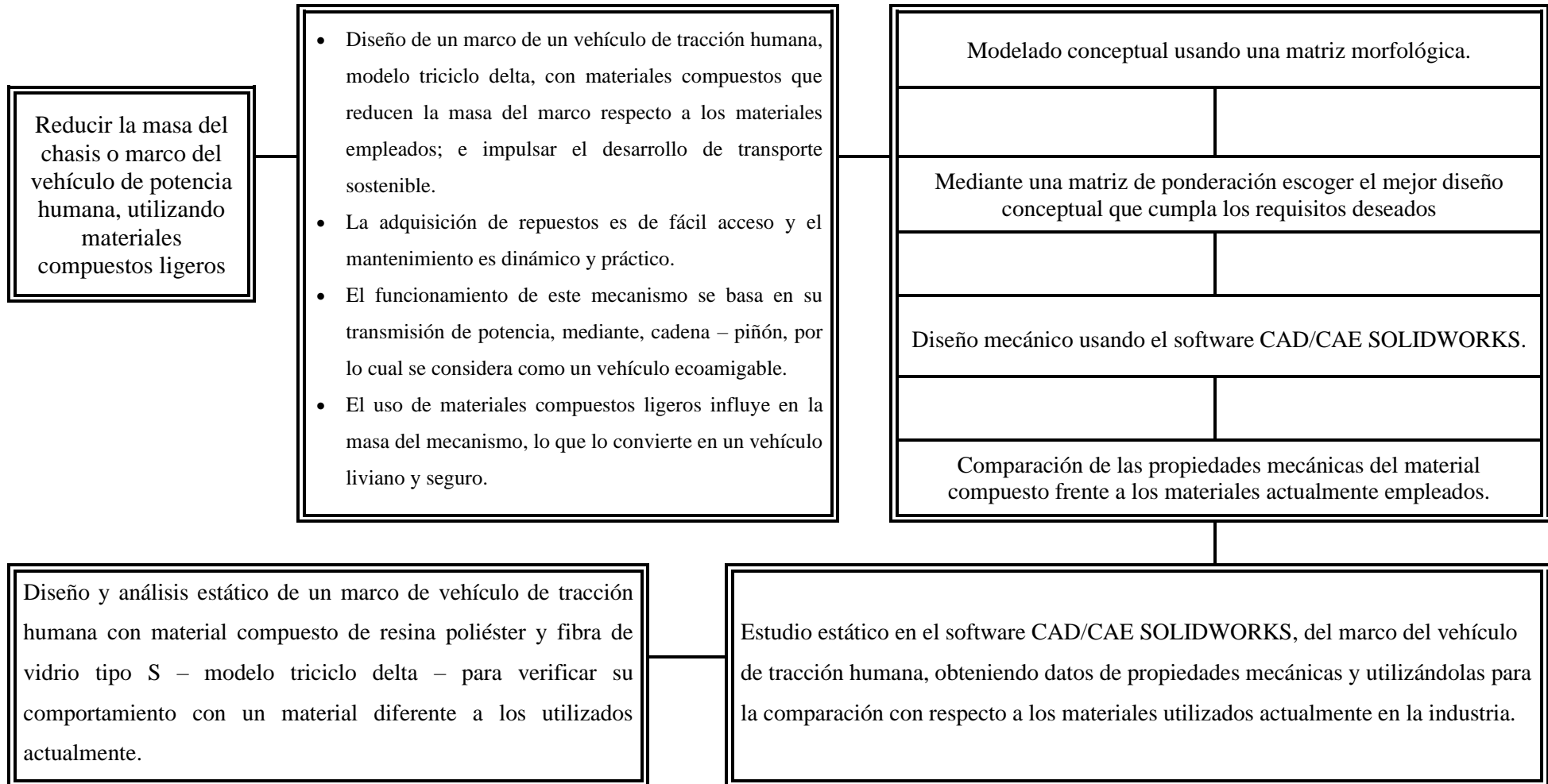
3.7. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

A partir de la información adquirida se realizó un criterio de selección mediante diferentes cuadros de importancia y morfología para determinar la forma, posición de sentado del piloto; influyendo, incluso, en la producción de potencia. Con esos criterios se planteó la acotación inicial de la estructura del marco y el ángulo base del respaldo.

Seguido, se acotaron las demás líneas guías de acuerdo a la ubicación de los elementos de interés y se extruye considerando un perfil geométrico, así como el tubo guía de la horquilla delantera

Así mismo, mediante los softwares CES EduPack y SOLIDWORKS se desarrolló un estudio estático para generar una comparativa entre materiales más usados en la industria de estos vehículos, de este modo, se verificó que el material escogido es ligero.

3.8. METODOLOGÍA DEL DISEÑO



Reducir la masa del chasis o marco del vehículo de potencia humana, utilizando materiales compuestos ligeros

- Diseño de un marco de un vehículo de tracción humana, modelo triciclo delta, con materiales compuestos que reducen la masa del marco respecto a los materiales empleados; e impulsar el desarrollo de transporte sostenible.
- La adquisición de repuestos es de fácil acceso y el mantenimiento es dinámico y práctico.
- El funcionamiento de este mecanismo se basa en su transmisión de potencia, mediante, cadena – piñón, por lo cual se considera como un vehículo ecoamigable.
- El uso de materiales compuestos ligeros influye en la masa del mecanismo, lo que lo convierte en un vehículo liviano y seguro.

Modelado conceptual usando una matriz morfológica.	
Mediante una matriz de ponderación escoger el mejor diseño conceptual que cumpla los requisitos deseados	
Diseño mecánico usando el software CAD/CAE SOLIDWORKS.	
Comparación de las propiedades mecánicas del material compuesto frente a los materiales actualmente empleados.	

Diseño y análisis estático de un marco de vehículo de tracción humana con material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S – modelo triciclo delta – para verificar su comportamiento con un material diferente a los utilizados actualmente.

Estudio estático en el software CAD/CAE SOLIDWORKS, del marco del vehículo de tracción humana, obteniendo datos de propiedades mecánicas y utilizándolas para la comparación con respecto a los materiales utilizados actualmente en la industria.

3.9. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 1: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
¿La reducción de masa atribuible al uso de un material compuesto de baja densidad influye sobre la resistencia estructural de un marco de vehículo de tracción humana en comparación a otros materiales?	GENERAL	GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE <ul style="list-style-type: none"> Diseño de un vehículo de tracción humana con chasis de material compuesto ligero de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S – modelo triciclo delta INDICADORES <ul style="list-style-type: none"> Fuerza (N) Esfuerzos (MPa) Factor de seguridad (Adim) Área (mm²) Ubicación centro de masa y gravedad (mm) VARIABLE DEPENDIENTE <ul style="list-style-type: none"> Reducir la masa del marco del mecanismo utilizando material compuesto ligero. INDICADORES <ul style="list-style-type: none"> Densidad (kg/m³) Masa (kg) Esfuerzo (Newtons) Esfuerzos (MPa) 	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Tipo aplicada-correlacional. TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS Observación de información a través de archivos audiovisuales, resultados obtenidos de los softwares. MUESTRA Y POBLACIÓN La unidad de estudio es el vehículo de tracción humana con chasis de materiales compuestos ligeros, modelo triciclo delta, La población serán los vehículos de tracción humana terrestres de tres ruedas.
	Diseñar y analizar estáticamente un vehículo de tracción humana con chasis de material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S.	Si se diseña un vehículo de tracción humana, que utilizará un material compuesto ligero, y analizándolo estática estructuralmente; entonces, se comprenderá el funcionamiento del mecanismo.		
	ESPECÍFICOS	ESPECÍFICOS		
	1. Evaluar el modelo triciclo delta considerando sus ventajas de diseño.	1. Si se evalúa el modelo VPH triciclo delta, entonces, se pueden obtener sus ventajas y utilizando una matriz de ponderación considerar los mecanismos de amortiguación y soporte más utilizados, así como el sistema de transmisión.		
	2. Realizar el modelo conceptual del vehículo de tracción humana y transmisión de potencia mediante mecanismo cadena – piñón.	2. Si se realiza el modelo y bosquejo conceptual del vehículo de tracción humana y transmisión de potencia mediante el mecanismo cadena – piñón a través de una matriz morfológica, entonces, el diseño ya terminado cumplirá con los requisitos propuestos.		
	3. Diseñar un marco de vehículo de potencia humana ligero mediante perfiles y medidas estandarizados, empleando el material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S, en el software CAD/CAE SOLIDWORKS.	3. Si se diseña el modelo mediante perfiles y medidas estandarizadas, entonces, permitirá un fácil mantenimiento y reemplazo de repuestos; asimismo, el empleo de los materiales compuestos de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S en el vehículo reflejará una relación esfuerzos – masa resistente, segura y liviana.		
4. Calcular y simular el marco de manera estática utilizando el material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S, mediante SOLIDWORKS.	4. Si se realiza la simulación estática utilizando el material compuesto Poliéster reforzado con fibra de vidrio S de baja densidad, entonces, se evaluará los esfuerzos, cargas máximas permisibles y factor de seguridad, observando como afecta a la resistencia estructural del marco del vehículo.			

IV. RESULTADOS

Ventajas de diseño de un vehículo de potencia humana – triciclo delta

Para determinar los parámetros a desarrollar en los siguientes objetivos, se tuvo en cuenta una matriz de necesidades - métricas que definen lo importante para diseñar el vehículo de potencia humana. Además, una matriz morfológica que considera cuatro (4) opciones y sus diferencias, de acuerdo a variables establecidas.

Es debido reconocer que, el triciclo estilo delta posee diferentes ventajas, las cuales combinadas implican un diseño conveniente para diferentes condiciones físicas en las personas, pues la estabilidad y seguridad de tres ruedas sobre el suelo significan un apoyo constante en reposo o circulación.

El diseño ha seguido factores definidos para su correcta manufactura y funcionamiento, pues la masa de los materiales y piezas requeridos influyen en el manejo y control del vehículo. El marco debe ser simple y liviano, al mismo tiempo resistente para soportar las diferentes secciones del sistema. Para ello se ha considerado un material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S, que, integrados en una matriz; se logra obtener propiedades químicas y mecánicas, en un material compuesto ligero, resistente mecánicamente; y, asimismo, a adversidades medioambientales.

Para ello, se elaboró una matriz de necesidades; la cual requiere una matriz de importancia con un rango determinado para identificar cuán necesario es la variable para el diseño futuro del vehículo triciclo delta. Se consideró un rango del 1 al 5; donde 1 implica “no importante” y 5 es “muy importante”.

Tabla 2: Matriz de importancia

No importante	Poco importante	Neutro	Importante	Muy importante
1	2	3	4	5

Con estos valores, se logró establecer en que elementos, bajo cierta necesidad, trabajar con mayor prudencia y consideraciones, pues bajo la premisa de este informe se debe destacar el marco del vehículo y los criterios de funcionamiento.

Tabla 3: Matriz de importancia sobre las necesidades

n °	NECESIDAD	Imp.
1	Seguridad	5
2	Estabilidad	5
3	Giro	4
4	Masa ligera	5
5	Ajuste de tamaño	4
6	Accesible para “x” tipo de personas	3
7	Uso de carenado o cubierta	2
8	Funciona con guardabarros	1
9	Mantenimiento con herramientas ordinarias	4
10	Permite reposición de piezas desgastadas	4
11	Tamaños de ruedas intercambiables	3
12	Resistente al polvo	5
13	Resistente a la humedad	5

De acuerdo a las necesidades de diseño, estas se ven reflejadas de forma directa en las siguientes métricas, las cuales habiendo satisfecho al modelo final; estas premisas son especificaciones medibles o de cierta manera importantes y considerables, como lo son las subjetivas.

En la siguiente matriz de métricas, se relacionan sus respectivas necesidades, verificando que algunas cuentan con más de una, debido a motivos prácticos.

Tabla 4: Matriz de valores y unidades métricas

Valor	Necesidad	METRICA	Imp.	Unidad
1	1	Uso de cinturón de seguridad	5	Subj.
2	1, 6	Uso de implementos de seguridad (casco)	5	Subj.
3	2, 8	Giro en curvas cerradas o en baja velocidad	4	m.
4	4, 6	Masa Total	5	kg
5	7, 8, 10, 11	Permite accesorios instalables	2	Subj.
6	2, 3, 5	Longitud de la pieza de dirección	3	m
7	2, 6, 8, 10, 11	Medidas de las ruedas	3	In
8	5	Resistencia a la flexión (carga)	5	N

9	12, 13	Resistente a partículas medioambientales	4	µm
10	9, 10	Montaje / desmontaje para mantenimiento	4	s

En esta tabla de doble entrada, se relacionan las métricas con sus respectivas necesidades.

Tabla 5: Matriz de Necesidades - Métricas

		MÉTRICA									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NECESIDAD		Uso de cinturón de seguridad	Uso de implementos de seguridad (casco)	Giro en curvas cerradas o en baja velocidad	Masa Total	Permite accesorios instalables	Longitud de la pieza de dirección	Medidas de las ruedas	Resistencia a la flexión	Resistente a partículas medioambientales	Montaje / desmontaje para mantenimiento
1	Seguridad	*	*								
2	Estabilidad			*			*	*			
3	Giro						*				
4	Masa ligera				*						
5	Ajuste de tamaño						*		*		
6	Accesible para "x" tipo de personas		*		*			*			
7	Uso de carenado o cubierta					*					
8	Funciona con guardabarros			*		*		*			
9	Mantenimiento con herramientas ordinarias										*
10	Permite reposición de piezas desgastadas					*		*			*
11	Tamaños de ruedas intercambiables					*		*			
12	Resistente al polvo									*	
13	Resistente a la humedad									*	

Seguidamente, se han seleccionado cuatro (4) opciones en una matriz morfológica comparativa, en la cual se definen parámetros importantes para el futuro diseño del modelo.

Tabla 6: Matriz morfológica

Opciones Parámetros				
Modelo	Zágita	Eco - Delta SX	Trix	Trigo Up
Autor	Paolo Castilla – Perú [21]	Sun Seeker – EE. UU. [22]	Hase Bikes - Alemania [23]	Hase Bikes – Alemania [24]
Material del marco	Acero ASTM A-36	Acero Soldado de alta resistencia	Aluminio	Aluminio 6061
Masa	25 kg	57 lbs / 25,85 kg	43 lbs / 19,5 kg	50 lbs / 22,7 kg
Forma	Deportivo con líneas curvadas	Recta con bordes redondeados	Recto con curvas suavizadas	Recto con curvas suavizadas
Altura vista desde el conductor	Baja	Alta	Baja	Media

Ergonomía	Posición Semi - Fowler	Sedente - Fowler	Semi – Fowler	Sedente - Fowler
Cubierta externa	Se puede cubrir desde el frente hacia atrás	Sin carenado	Desde la parte frontal hacia la posterior	Cubierta plegable desde el frontal hacia la parte posterior
Estructura	Estructura principal rígida de acero, con piezas flexibles.	Piezas de acero unidas por pines a presión.	Múltiples piezas rígidas unidas por pernos.	Múltiples secciones rígidas por pernos.
Transmisión	A una rueda trasera de forma directa (cadena – piñón)	A ruedas traseras, de forma directa cadena – piñón con rueda libre	2x3 Trasera con diferencial de cadena.	2x3 Trasera con diferencial de cadena.
Dirección	Delantera con empuje lateral	Delantera directa	Delantera	Delantera
Amortiguación	Brindada por las mismas ruedas y aros.	Llantas y aros.	Llantas y aros.	Llantas y aros.
Frenos	Frenos de pinza	Frontal freno de pinza Trasero freno de disco mecánico	Las ruedas posteriores utilizan freno de disco	Freno de disco en las ruedas traseras
Diferencial	No cuenta.	No cuenta.	Caja de cambios con diferencial	Caja de cambios con diferencial.

Los cuadros resaltados en la matriz morfológica representan funciones que sirven de inspiración para el modelo desarrollado en esta tesis. Pues, estas características han sido consideradas como ventajas de diseño en la practicidad real y; de manera subjetiva, un atractivo del vehículo.

En esta relación los parámetros seleccionados son; la forma del vehículo, la altura a la que el conductor posiciona la vista, sentado; el tipo de ergonomía con la razón de evitar grandes esfuerzos ejercidos por la persona, la estructura (define como se compone y une el marco y las demás piezas), el tipo de transmisión, como se desarrolla la dirección, los tipos de frenos instalados y si cuenta con alguna caja diferencial o de cambios.

Teniendo en cuenta el material compuesto de resina poliéster y fibra de vidrio tipo S, el cual, es preferible manufacturarlo en un molde único, o en piezas grandes para evitar debilitamientos del material; se ha preferido un diseño que permita la conexión de piezas mediante pines en las uniones; y, en su defecto de molde único, disponer de zonas de soportes para las demás partes del vehículo.

Concepto y consideraciones.

Se han elaborado dos (2) conceptos mediante bosquejos para la decisión de desarrollo de diseño en software, estos han sido realizados en orden para empezar el proyecto, recurriendo al planteamiento de forma del marco y la configuración de piezas del vehículo. Se ha tenido en cuenta los parámetros considerados en el anterior apartado, y de forma aproximada se han dibujado las vistas isométricas de estos.

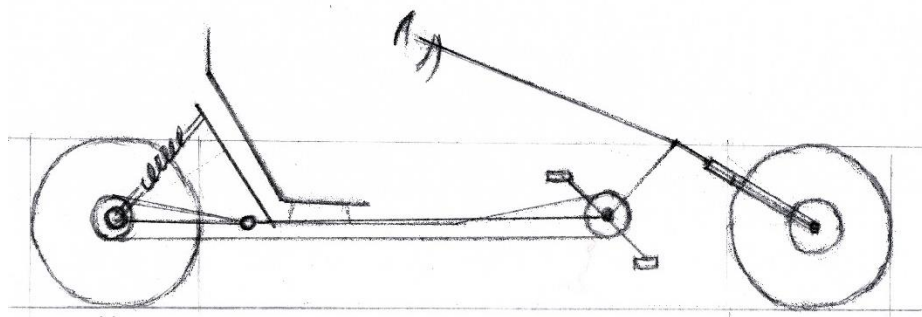
Estas aproximaciones no solo muestran dibujos, sino también las partes a tener en cuenta y los criterios para generar una solución de diseño. Estos sugieren una línea base de la idea final. Pues, los aspectos importantes de este sistema de conceptualización, son el desarrollo y la evaluación final.

Durante esta etapa se pueden definir diferentes puntos, piezas, o sistemas complejos; sin embargo, estos últimos requieren de una investigación para asegurar que sean prácticos, fiables y viables. Esto, implica las diferentes fases de acople y los subsistemas necesarios para la funcionabilidad correcta y segura del vehículo.

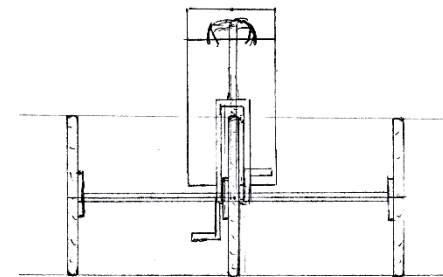
Los conceptos desarrollados se definen como *“bosquejo A”* y *“bosquejo B”* planteados en las vistas superior, planta, lateral, isométrica e isométrica señalada con razón de ayudar y tener una mayor definición de forma y tamaño estimado.

La idea se ha enfocado en un sistema, con las necesidades, que un usuario promedio de este tipo de vehículos contempla; siendo las principales: el mantenimiento, sea de limpieza, recambio de piezas o uso de adicionales como grasa o aceite lubricante; la seguridad y estabilidad que brindan las tres ruedas y el marco; y la masa liviana respectiva del material referido en conjunto con los demás componentes.

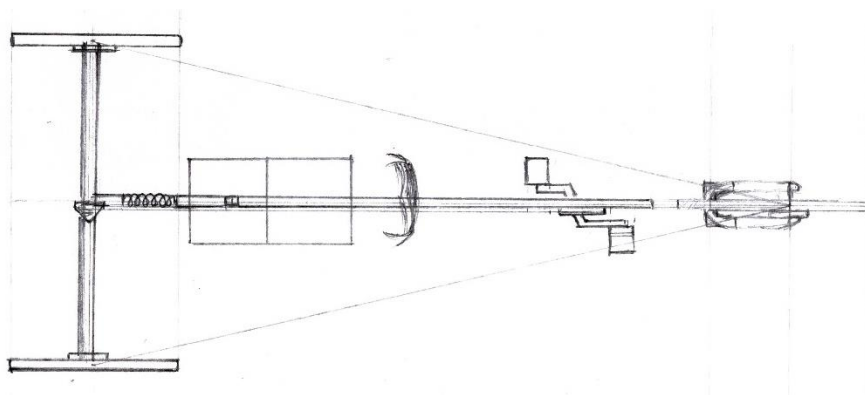
Bosquejo A – Vistas isométricas



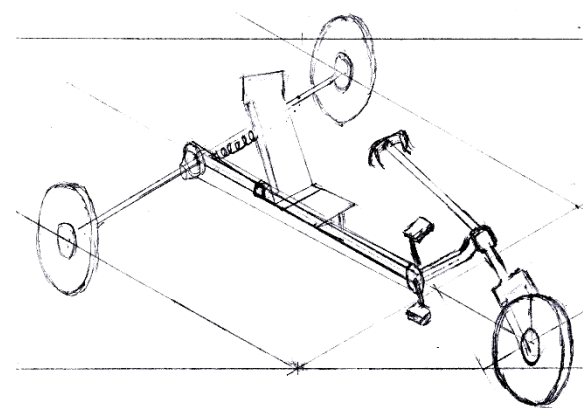
Vista frontal



Vista lateral



Vista superior



Vista isométrica

Fig. 8: Vistas isométricas del Bosquejo A de un triciclo delta

En esta representación gráfica (Bosquejo A) se ha tenido en cuenta el estilo delta, con una transmisión de cadena – piñón posterior y la dirección de forma directa a la rueda delantera. Asimismo, una amortiguación de un único sistema de suspensión en el eje trasero y con un asiento y timón ajustable para diferentes tallas.

El funcionamiento de transmisión por cadena hacia las ruedas posteriores es dominado por el conjunto de piezas, catalina, cadena y un diferencial por cadena; esta última permite el giro individual de cada rueda manteniendo la potencia de la opuesta en situaciones de desniveles o giros en curvas del trayecto.

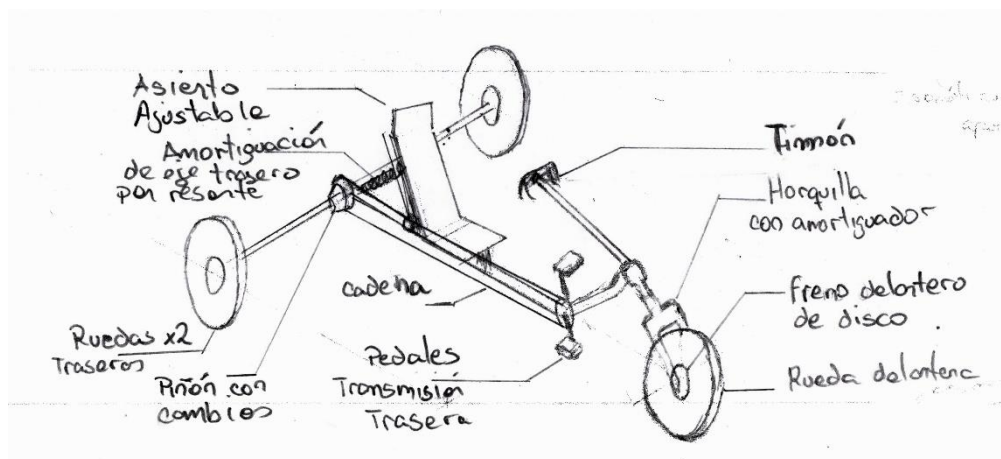
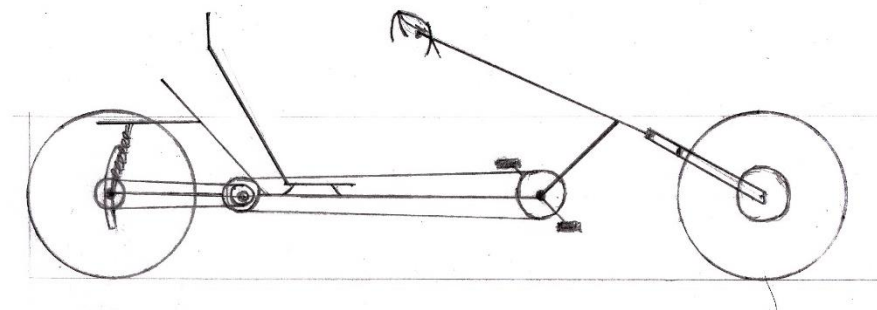


Fig. 9: Piezas principales del Bosquejo A

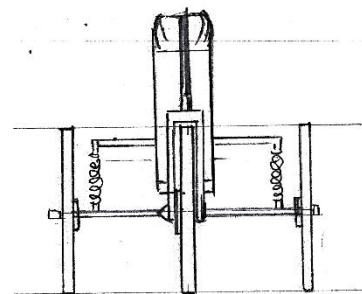
En esta imagen (Fig. 9) se presentan algunas partes con las que contará el modelo final, como los frenos de discos, la amortiguación de la horquilla delantera; y como será definido el marco del triciclo.

Cabe resaltar que, el esquema final del marco será con esquinas curvadas, para producir atracción al usuario, y evitar intersecciones robustas y rígidas si el delineado es con esquinas rectas, además de detalles añadidos como el carenado, guardabarros, pintura, entre otros detalles subjetivos decorativos.

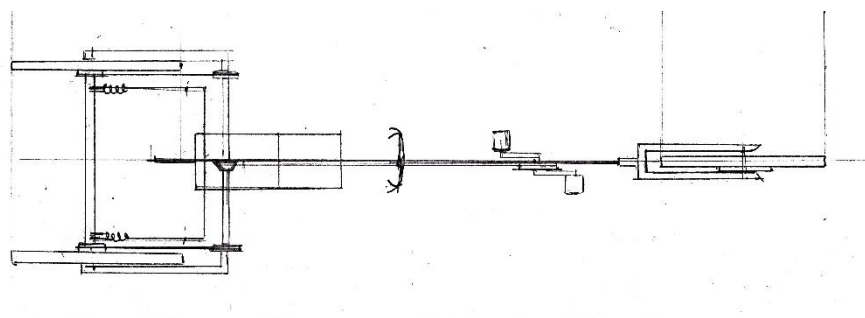
La siguiente ilustración (Fig. 10) presenta una variación en la parte posterior, concerniente a la transmisión de cadena y a la amortiguación por doble suspensión al eje. Ambos planteamientos (*bosquejo A* y *bosquejo B*) comparten la dirección delantera, la suspensión de la horquilla, el ajuste del asiento y el timón de acuerdo a la talla del conductor; además del estilo del marco. Es debido respetar el objetivo del proyecto, el cual es mantener una masa liviana y las necesidades estimadas.

Bosquejo B – Vistas isométricas

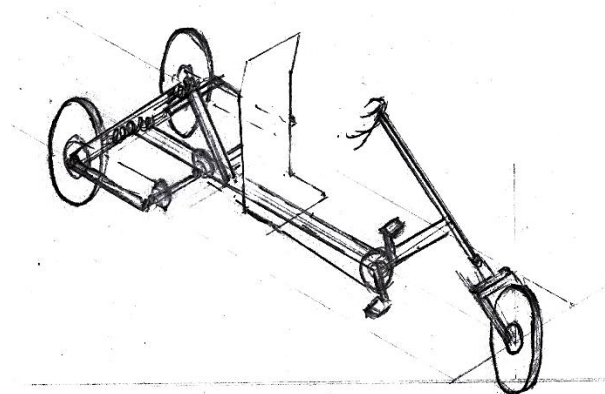
Vista frontal



Vista lateral



Vista superior



Vista isométrica

Fig. 10: Vistas isométricas del Bosquejo B de un triciclo delta

El sistema que lo diferencia del anterior presentado, es la doble suspensión sobre el eje trasero, la cual permite una mayor amortiguación para el usuario y que cada rueda sea independiente de la otra al variar su altura frente a algún desnivel de terreno o curva cerrada o abierta.

La transmisión por cadena, es desarrollada por una catalina principal donde se encuentran los pedales, luego un piñón acoplado a un eje transmite la potencia a dos catalinas ubicadas a cada lado paralelamente, y estas transfieren el movimiento hacia dos piñones ligados a cada rueda posterior directamente.

Esta disposición combinada con la amortiguación posibilita un giro independiente en cada rueda, sino también una variación de altura frente a distintos terrenos y trayectorias.

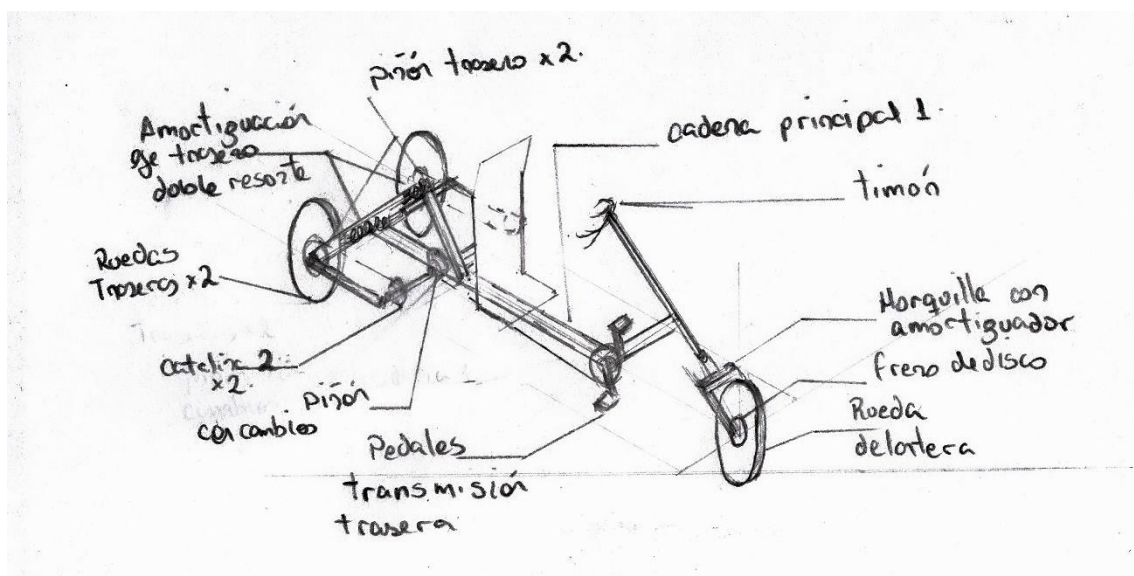


Fig. 11: Piezas principales del Bosquejo B

Cada diseño presenta ideas personalizadas de funcionamiento, las cuales han sido analizadas para comprobar las ventajas de cada uno, pues estas representaciones gráficas suponen una sugerencia para el modelo final; es reconocible poder integrar ambos borradores y sus diferentes combinaciones de mecanismos para encontrar la plantilla ideal, que supere la línea base establecida, aparte de solucionar fallas de interacciones entre piezas dinámicas, ensamblajes o complicaciones de diseño y manufactura.

Ergonomía, antropometría y su relación con la producción de potencia

Este tipo de vehículo utiliza energía transmitida por personas, siendo una alternativa de transporte eficiente al medio ambiente. El desarrollo de este móvil implica varios sistemas complejos para su funcionamiento, y uno de ellos es la ergonomía, la cual, no

solo proporciona confort, pues, de acuerdo al planteamiento de Whitman “algunos factores ergonómicos claves a considerar son la potencia, rendimiento, comodidad, dinámica, la seguridad, preocupaciones ambientales, y las relaciones antropométricas” [7, p. 164]; esto sumado a la posición longitudinal de los pedales y el sistema de transmisión de potencia, se debe resaltar la antropometría para un correcto diseño y colocación de piezas.

El desempeño también es afectado por la aerodinámica, el ángulo de reclinación del usuario, dado que el esfuerzo producido puede aumentar como disminuir de acuerdo a las fuerzas de arrastre, recordando la necesidad de producir un mayor torque sin generar fatiga.

Como sostiene Gross *et al.* [25] quien describe el “Efecto de optimización” o “Efecto de aceleración”, la mejora del rendimiento de este tipo de vehículos, respecto a la efectividad del área frontal, que se define como el producto del coeficiente de arrastre y el área frontal proyectada.

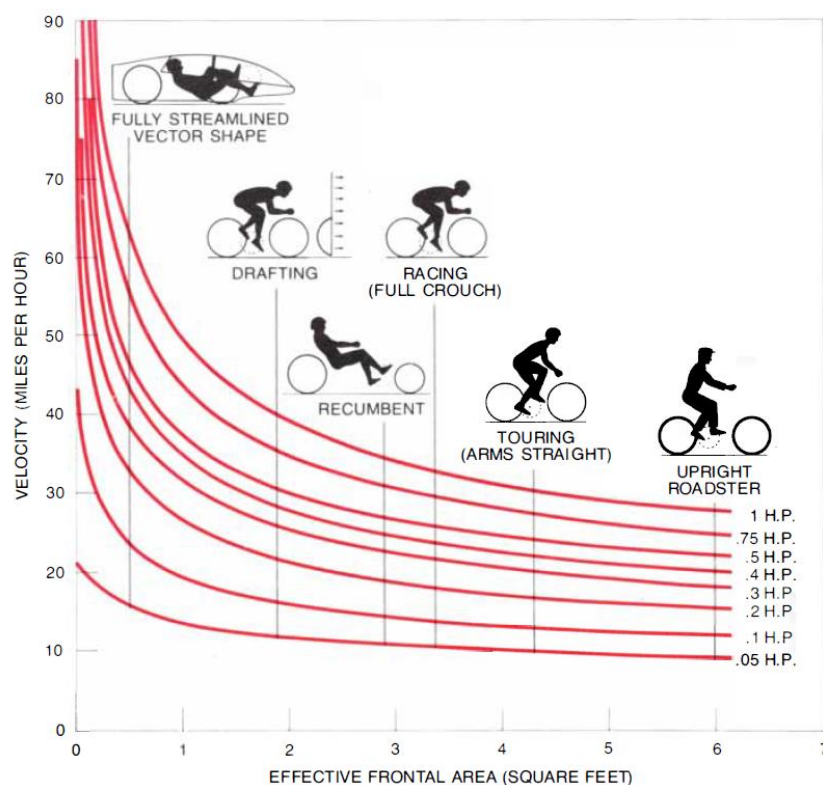


Fig. 12: Efecto de aceleración de diferentes VPH – Velocidad vs Área frontal efectiva [25, p. 149]



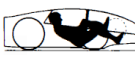
La gráfica presentada (Fig. 12), indica diferentes vehículos de potencia humana con diferentes configuraciones de usuario y uso; siendo el “Fully Streamlined Vector Shape”

con menor área frontal, quien puede ejercer una mayor velocidad a una potencia de 1 H.P., la bicicleta tipo “Touring” y “Upright Roadster”, debido a la postura del piloto, presentan una mayor superficie frontal y menor velocidad utilizando la misma potencia; y, el estilo “Recumbent HPV”, el cual es el caso de estudio de esta investigación; se encuentra en una estimación equilibrada entre la velocidad y la potencia ejercida, además del área frontal que posee.

Asimismo, los autores, exponen un análisis comparativo del coeficiente de arrastre relacionado al estilo del vehículo de diferentes modelos, tales como: estándar, mejorados poseedores de récords y límites teóricos.

Sin embargo, el presente documento se centra en los estilos de tipo reclinado, a fin de recopilar información de estudios dinámicos para el análisis futuro.

Tabla 7: Comparativa dinámica de vehículos con estilo reclinado

Descripción	Fuerzas a 20 MPH (Libras)	Data aerodinámica			Coeficiente de resistencia a la rodadura	Nivel del suelo, sin viento			Efecto de colinas				
		Coeficiente de arrastre	Área frontal (ft ²)	Área frontal efectiva (ft ²)		HP requeridos	Paseo todo el día (MPH)	Velocidad máxima MPH	Velocidad constante de subida (MPH)	Velocidad constante por inercia (MPH)			
MEJORADOS	Recumbent (Usuario novato)	12kg bicicleta		2,97	0,77	3,8	2,9	0,005	75	14,4	35,2	12,5	33,7
		75kg usuario											
		Ruedas 20 in frontal 27 in trasera – 90 psi											
POSEEDORES DE RECORDS	Blue Bell (Two wheels – one rider)	18kg bicicleta		0,61	0,12	5	0,6	0,004	27	22,5	58,6	12,9	77,4
		75kg usuario											
		Ruedas 20 in frontal 27 in trasera – 105 psi											
POSEEDORES DE RECORDS	Vector Single (Three Wheels)	30kg bicicleta		0,51	0,11	4,56	0,5	0,0045	29	21,8	61,2	11,3	90,1
		75kg usuario											
		Ruedas 24 in frontal 27 in trasera											

Fuente: Scientific American Library [25, p. 150]

Estos tres (3) modelos son del tipo reclinado, respetando el número de ruedas (dos o tres), la postura del conductor, la cubierta que limita el área frontal, entre otros parámetros establecidos por los autores; en el análisis estático y dinámico son importantes para los cálculos de masa, centro de gravedad, tamaño y material de piezas. Son de motivo contemplar los valores obtenidos para los futuros resultados.

La posición o postura del conductor puede afectar la generación de potencia para iniciar o mantener el movimiento de manera suave y estable. Además de la complejidad humana propia del usuario, existen factores biomecánicos internos, tales como la musculatura, torque y producción de potencia; que deben relacionarse de manera proporcional con factores mecánicos externos, como distancias del pedal al asiento, longitud y ángulo del brazo al timón, inclinación del respaldar, entre otros [26]. Y, de acuerdo a Too, en su primer estudio y experimentación sobre vehículos reclinados [27], esta dependencia se basa en las distancia y ángulos de nuestras extremidades y articulaciones en el momento de utilizar dicho móvil. En la fecha, jóvenes de diferentes edades probaron determinados ángulos de asiento, entre los grados 0 y 100, realizados con un ergómetro Monark; y a cada ángulo estimado, el asiento también es inclinado para una mejor postura. Las variaciones de pendiente son realizadas a la cadera, tobillo y rodilla; estableciendo valores promedio registrados en la siguiente tabla:

Tabla 8: Relación entre los ángulos de las articulaciones y la potencia generada

Ángulo del asiento	Ángulo medio de la cadera	Ángulo medio de la rodilla	Ángulo medio del tobillo	Potencia media de salida	Tiempo de ciclismo
0°	130,9°	95,5°	113,4°	126 W	9,5 min
25°	113,4°	97,9°	95,3°	145 W	12,05 min
50°	100°	103,3°	93,6°	166,6 W	15,01 min
75°	76,8°	103,6°	96°	172,8 W	16,03 min
100°	59,9°	103,8°	91,8°	160,5 W	13,43 min

Fuente: Informe de tesis [7, p. 149].

Se aprecia a Too y Whitman coincidir en que el mejor ángulo de inclinación del asiento corresponde a 75°, pues desarrolla un mejor desempeño con un ángulo de cadera de 76,8° [27, p. 54], [7, p. 149]. Asimismo, no se debe despreciar las modificaciones subjetivas o intuitivas, pues la variación de altura de una persona influye proporcionalmente en la potencia y torque generado, entonces se deba modificar la pendiente del sistema indicado a lo que el usuario prefiera.

El ergómetro utilizado se basa en la posición de la figura 13, siendo el ángulo base, la relación del tubo del asiento con la horizontal. Este sistema respecto a la potencia generada, en comparación a un sistema reclinado, es menor debido al descanso lumbar.

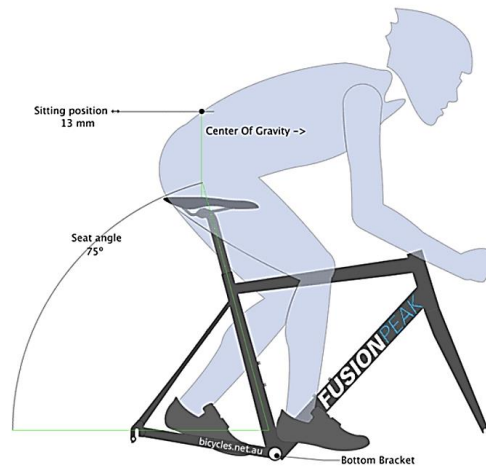


Fig. 13: Representación del ángulo del asiento en una bicicleta vertical [28].

El sistema de ciclismo vertical se analizó con el siguiente modelo mecánico brindado por Ferrer *et al* [29, p. 62] con su respectivo análisis cinemático 2D y los ángulos en el plano sagital, correspondientes a puntos de articulación de la cadera, rodilla y tobillo. Presentando, que, los movimientos generados por las extremidades y la cadera durante el pedaleo, sea vertical o reclinado, imprimen una onda sinusoidal detallada en la figura 15.

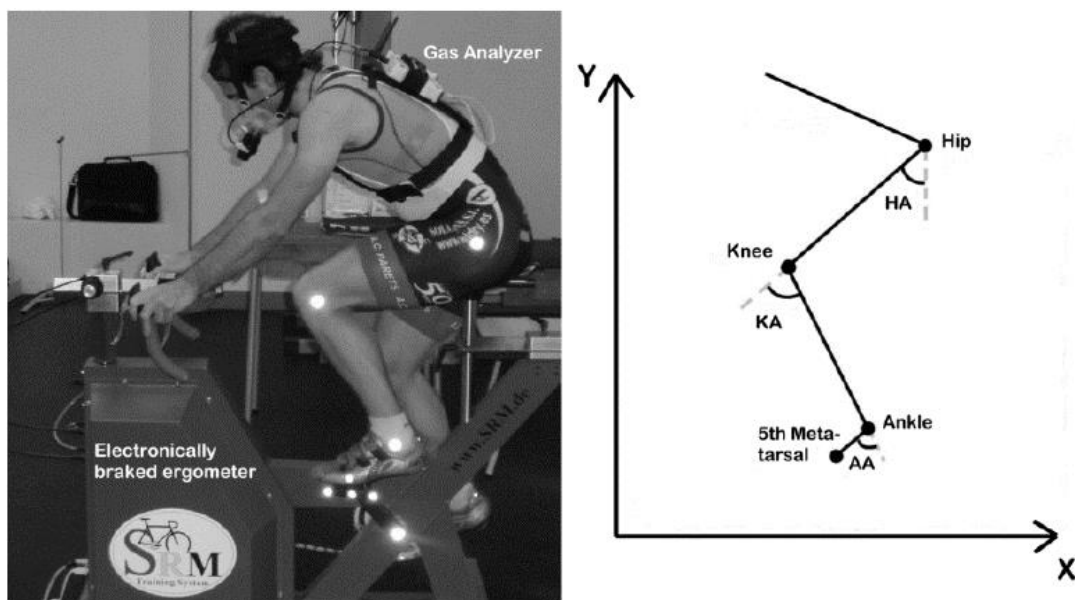


Fig. 14: Modelo mecánico y análisis cinemático de un sistema de ciclismo vertical. (HA- Hip Angle; KA- Knee Angle; AA- Ankle Angle) [29, p. 62].

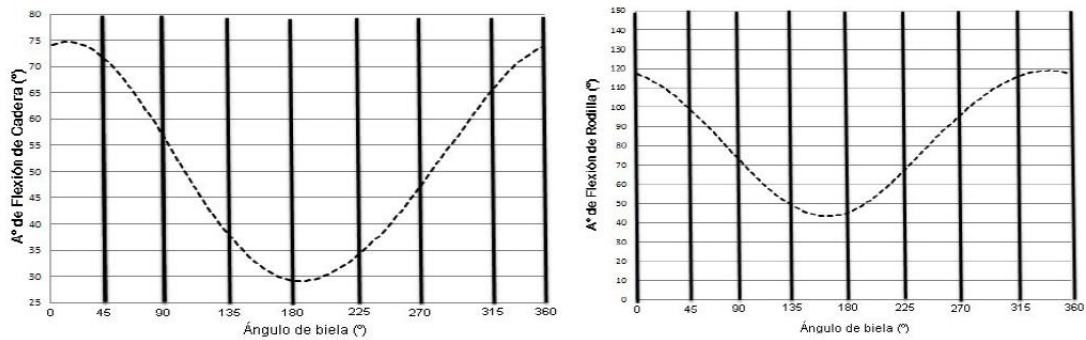


Fig. 15: Ondas sinusoidales desarrolladas por el ángulo de la biela y la flexión de la cadera y la rodilla [29, p. 63].

Los valores obtenidos en una comparativa de ciclismo entre un sistema vertical (upright) y reclinado (recumbent) mostrados en la figura 16, han sido tratados en el estudio fisiológico de Bonzheim *et al* [30], detallando que algunos parametros no presentan significante comparativa tales como el consumo de oxígeno y ritmo cardiaco; no obstante, en la potencia de salida en Watts y el tiempo de ejercitación en minutos, sí existe diferencia considerable a favor del sistema reclinado.

TABLE II Comparison of Maximal Exercise Responses to Recumbent and Upright Cycle Ergometry*			
	Recumbent	Upright	p Value
Oxygen consumption (ml/kg/min)	22.7 ± 1.5	22.6 ± 1.6	NS
Heart rate (beats/min)	141 ± 3	145 ± 5	NS
Oxygen pulse (ml/beat)	14.0 ± 0.9	13.5 ± 0.9	NS
Ratings of perceived exertion	17.9 ± 0.3	17.7 ± 0.3	NS
Ratings on Feeling scale	+3.7 ± 0.3	+2.9 ± 0.4	NS
Systolic blood pressure (mm Hg)	202 ± 6	204 ± 4	NS
Diastolic blood pressure (mm Hg)	90 ± 4	91.6 ± 3	NS
Rate pressure product (mm Hg × beats/min × 10 ⁻²)	285 ± 12	297 ± 12	NS
Power output (W)†	177 ± 7	154 ± 5	0.001
Exercise time (min)	13.8 ± 0.5	11.8 ± 0.4	0.001
Respiratory exchange ratio	1.2 ± 0.03	1.3 ± 0.03	NS
Minute ventilation (liters/min)	89 ± 6	96 ± 7	NS

*Values are expressed as mean ± standard error; †1 W = 6.12 kg·m/min⁻¹.
NS = not significant.

Fig. 16: Comparativa en máximo ejercicio entre ciclismo reclinado y vertical [30, p. 42].

El sistema reclinado, característica de un triciclo estilo delta; se define, en la figura 17; determinando el plano sagital de ángulos en las articulaciones representativas de acuerdo a una línea base, que será requerida para la ubicación del marco del vehículo.

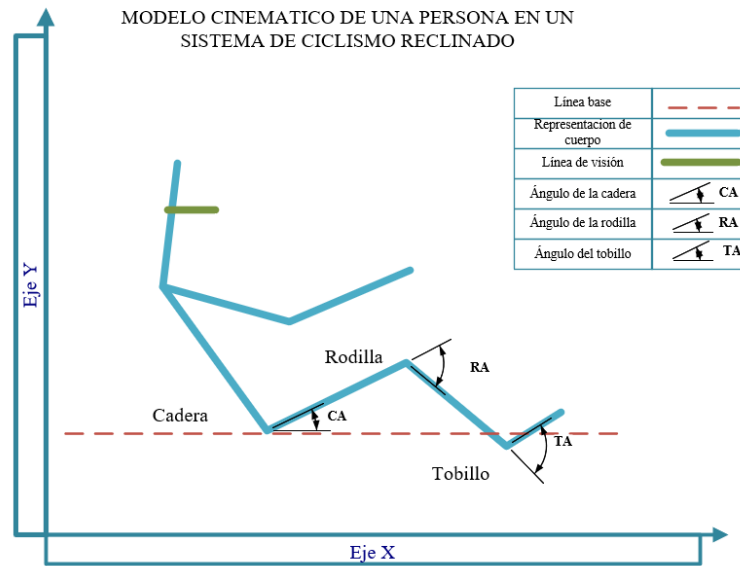


Fig. 17: Modelo cinemático de una persona en un sistema de ciclismo reclinado

De acuerdo a la línea de diseño, se contempla el confort del usuario, guardando relación con la distancia desde el asiento hacia los diferentes elementos que conforman el sistema; siendo relevantes: los pedales y el manillar. La altura o distancia de configuración pueden afectar al desempeño, y en consecuencia de una incorrecta práctica, perjudicar al conductor. Los cambios de altura, distancia e inclinación pueden realizarse debido a la comodidad, relación de fuerza / velocidad / potencia y fatiga por pedaleo.

Distribución de piezas y elementos

Desde hace largo tiempo los vehículos de potencia humana han servido tanto de transporte de entretenimiento / ejercicio, de uso competitivo o de oficio de carga. La evolución de estos sistemas implica, no solo la forma, igualmente las piezas y elementos a requerir para su funcionamiento, han cambiado. Sistemas con piezas, o incluso los materiales usados en la fabricación, son más livianos, desarrollando una mayor eficiencia de movimiento en relación a potencia y velocidad. Sin embargo, aún se mantienen los materiales convencionales, tales como acero y aluminio. E ingresando, al mercado de vehículos de entretenimiento, los materiales livianos y compuestos como la fibra de carbono.

Antropometría y tallaje

Para el diseño del modelo se plantearon bosquejos que sirven de inspiración para su elaboración, las partes y elementos necesarios fueron definidos de acuerdo a las necesidades preliminares y que complementan al material, bajo premisas de perfiles

estandarizados y comerciales. Asimismo, las medidas y relaciones de posición son comprendidas bajo parámetros geométricos establecidos por la antropometría de la población dirigida. Las dimensiones corporales se han definido por la técnica de antropometría, método económico, simple y accesible a todo investigador; en comparación a métodos de escaneo tridimensional, a pesar de una mayor precisión [31]. El procedimiento tradicional se verifica siguiendo las características planteadas por Taifa *et al* y Milián *et al*; en la siguiente figura se presenta la antropometría más utilizada.

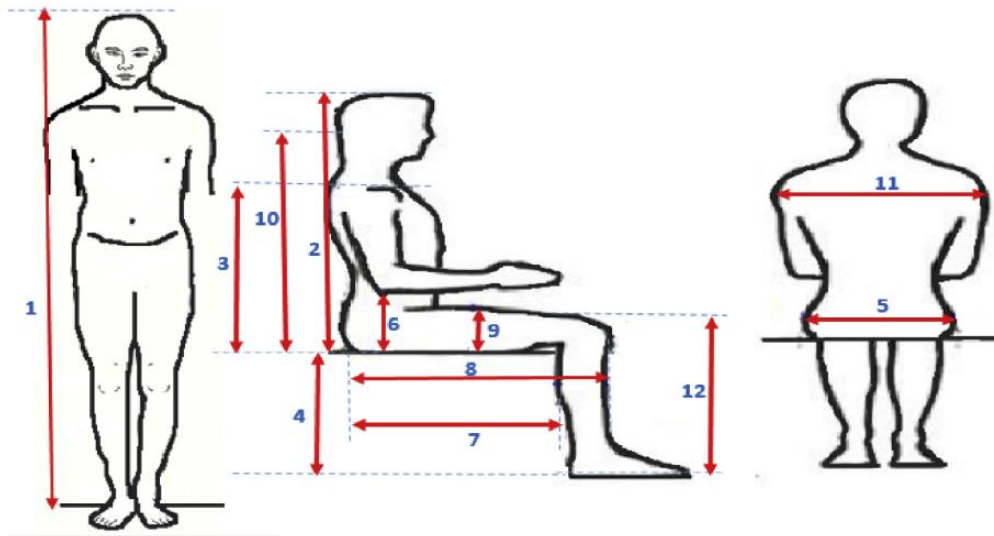


Fig. 18: Parámetros antropométricos [31, p. 234]

Siendo: (1) Estatura erecta, (2) Altura sentado, (3) Altura de hombro sentado, (4) Altura poplíteica, (5) Anchura de la cadera sentado, (6) Altura del glúteo – codo, (7) Longitud glúteo – poplíteo, (8) Longitud glúteo – rodilla, (9) Longitud del muslo, (10) Altura del ojo sentado, (11) Ancho del hombro, (12) Altura de la rodilla, (13) Peso [31, p. 234].

De acuerdo a la investigación y estudio de Asgari *et al* [32] la altura media masculina y femenina peruana registrada en la muestra corresponde a 165,3 cm y 152,9 cm respectivamente. Son destacables las raíces pluriculturales y multiétnicas del país, siendo una de las poblaciones con alta variabilidad respecto a la masa y altura; y conforme a Escobar [33], los habitantes peruanos respecto a otras poblaciones y países del mundo son los más pequeños.

Los datos representativos para las longitudes del marco se basan sobre una medida promedio entre el hombre y mujer peruano, y en su homónimo estadounidense; esto

debido a la limitada información de estudios peruanos, pues, estos registros requieren de gran esfuerzo e inversión económica para la ejecución; además, de manera general, el censo se debe repetir con periodicidad. Y esto, en relación a equipos o elementos no manufacturados bajo una normativa peruana, genera una problemática ergonómica debido a la variación antropométrica.

Para ello, las medidas a disponer son;

Tabla 9: Medidas antropométricas

PARÁMETROS ANTROPOMÉTRICOS
Estatura
Largura del brazo
Largo del antebrazo
Altura sentado
Altura de ojos sentado
Altura de hombros sentado
Altura poplítea erecto
Altura a la rodilla
Distancia de glúteo - poplíteo
Distancia de glúteo - rodilla

Fuente: Manual de medidas antropométricas [34].

Estos parámetros han sido establecidos en el siguiente modelo cinemático con apoyo del cuerpo del modelo “muñeco de pruebas” de Fernando Santos, para una mayor acotación de longitudes sobre los miembros inferiores y superiores, además de las distancias del tronco hasta puntos referenciales de la cabeza, como los hombros y ojos.

La posición mostrada es tal como el piloto del triciclo delta se posicionará, siendo relevante el movimiento horizontal para el ajuste de estatura, distancia desde la zona lumbar hasta el punto de torque máximo en la zona propulsiva del pedal. Así como la inclinación del respaldar a favor de la zona lumbar. De la misma manera el manillar no debe interferir con la altura o ángulo de visión y estar a una elevación por debajo del nivel de los hombros para permitir una irrigación de sangre correcta y saludable.

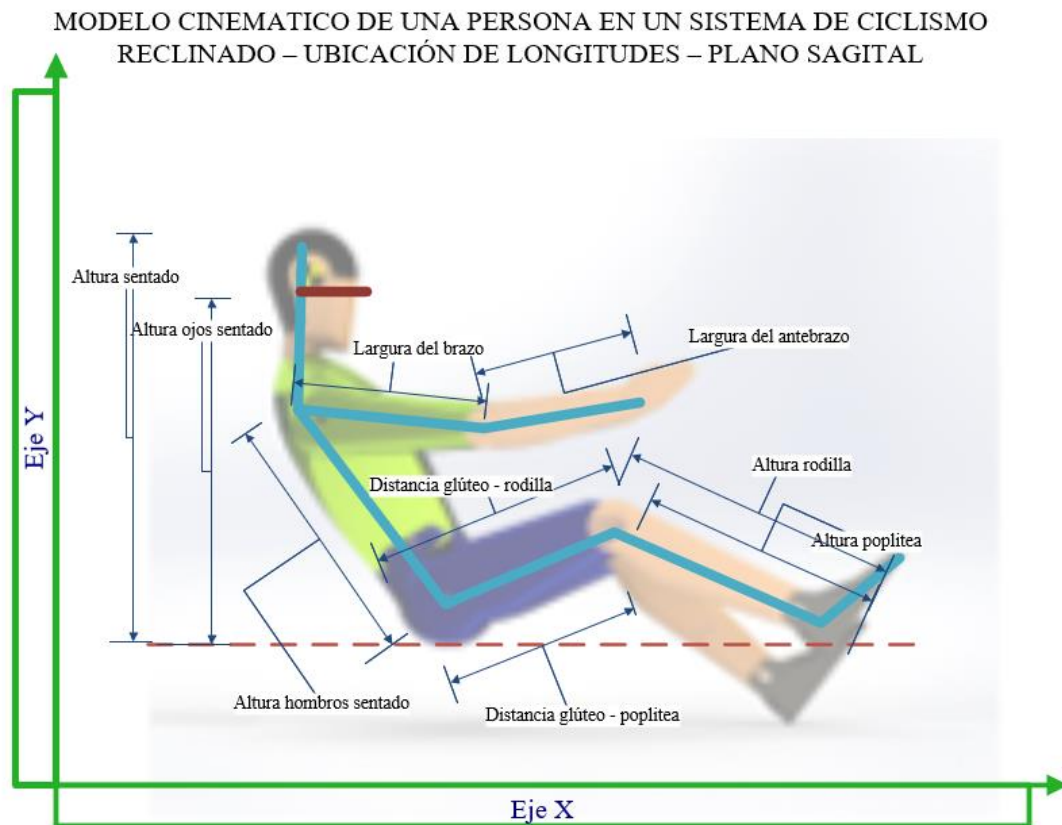


Fig. 19: Modelo cinemático de una persona en un sistema de ciclismo reclinado con la ubicación de longitudes en el plano sagital, adaptado del modelo “muñeco de pruebas” de Fernando Santos [35].

De acuerdo a los datos a promedio, se revisaron otras investigaciones aplicables al tallaje peruano, y de estatura estadounidense, sin embargo, esta información es limitada respecto a la cantidad de personas examinadas o en su defecto, incompletas referentes a los parámetros a evaluar. Para completar los datos necesarios se aplica el método de interpolación polinomial, de igual forma se ha determinado una talla fija para futuros cálculos basada en la estatura de 1,70m.

La estatura de 1,70m; es una altura promedio en muchas ciudades del mundo tanto para varones y mujeres; respetando la influencia y variedad genética de la cultura y población. En Perú, es relacionada la talla con una complejión media de cuerpo y masa; por ello el planteamiento y fijación sobre esta, para los cálculos de diseño del modelo del vehículo triciclo delta y el posicionamiento de piezas y elementos del mecanismo.

Además, los valores coma decimal o centesimal no son relevantes en piezas de gran tamaño, por ello la aproximación en centímetros es en coma decimal (ej. \checkmark 1,5cm - \times 1,52cm). A diferencia de los elementos pequeños o bajo estándares comerciales donde

se deben respetar las medidas, entonces la coma se mantiene de acuerdo al catálogo o librería de referencia.

Tabla 10: Datos antropométricos

DATOS ANTROPOMÉTRICOS								
Estudio o investigación	Perfil antropométrico de trabajadores del Perú utilizando el método de escala proporcional [33]							
	A positively selected, common, missense variant in FBN1 confers a 2.2 centimeter reduction of height in the Peruvian population [32]	Diseño de un método para la determinación de las medidas antropométricas para ser usadas en el tallaje de la población peruana [36]	Diseño antropométrico del mobiliario de estudio para alumnos universitarios en Perú [37]	Anthropometric Reference Data for Children and Adults: United States, 2007–2010 [38]				
POBLACIÓN								
Personas examinadas	1795	1339	56	44	297	253	12007	12726
DATOS ANTROPOMÉTRICOS EN CENTÍMETROS								
ANTROPOMETRÍA	M	F	M	F	M	F	M	F
Estatura	165,3	152,9	166,56	155,33	170,29	158,29	175,08	161,24
Largura del brazo	32,9	30,9	33,30	31,22	34,5	31,6	36,9	31,98
Largo del antebrazo	41,3	36,3	42,51	38,94	46,11	42,16	50,73	45,37
Altura sentado	87,3	82,1	87,64	82,88	88,64	83,84	89,93	84,79
Altura de ojos sentado	77,5	72,9	77,44	73,10	77,25	73,35	77,01	73,6
Altura de hombros sentado	58,4	55,1	61,73	56,4	71,6	57,99	84,27	59,57
Altura poplíteo erecto	40,9	37,0	42,44	40,18	46,99	44,06	52,84	47,92
Altura a la rodilla	51,7	46,6	53,04	49,96	56,99	54,06	62,08	58,14
Distancia de glúteo - poplíteo	46,4	45,1	46,42	45,4	46,47	45,77	46,54	47,22

Distancia de glúteo - rodilla	56,6	54,4	56,66	54,32	56,83	54,23	57,05	54,14
-------------------------------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fuente: Datos antropométricos adaptado de [32] [36] [37] [38]

Las celdas sombreadas en color amarillo (Tabla 10) presentan resultados interpolados entre los estudios de Escobar y Pastor *et al*, para obtener una estimación de valores a la estatura seleccionada de 1,70m

Tabla 11: Datos antropométricos en cm

ANTROPOMETRÍA	M [cm]	F [cm]
Estatura	170,0	170,0
Largura del brazo	34,4	33,24
Largo del antebrazo	45,83	54,87
Altura sentado	88,56	87,39
Altura de ojos sentado	77,27	74,28
Altura de hombros sentado	70,83	61,11
Altura poplíteo erecto	46,64	59,2
Altura a la rodilla	56,68	70,07
Distancia de glúteo - poplíteo	46,47	69,03
Distancia de glúteo - rodilla	56,82	53,78

Obteniéndose los resultados a cada parámetro definido mediante la interpolación polinomial de cada investigación, para la estatura de una persona de 1,70m. Siendo las medidas (alturas y distancias) masculinas las referencias de diseño debido a la mínima desviación; contrario a los valores femeninos, en donde la altura de la rodilla presenta un aumento considerable respecto al historial registrado.

Inclinación del ángulo del asiento, línea horizontal y respaldar

La geometría del triciclo es planteada acorde a los estudios de Too y Whitman, respetando los ángulos base, se extrajo el rango de grados del asiento respecto a la cadera, 50° a 100°; limitándolo a los valores entre 65° y 85°, y mediante el método de

interpolación polinomial visualizar los datos de potencia media de salida y tiempo de ciclismo proyectados correspondientes a una variación en 5° .

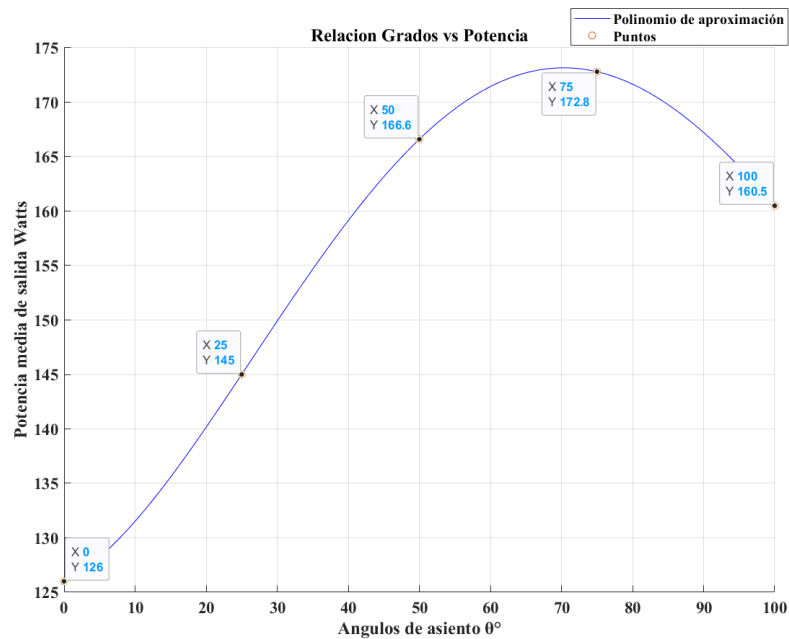


Fig. 20: Curva con ajuste de la relación de ángulos del asiento y la potencia de salida en Watts

En los datos recopilados (Fig. 20) se ha verificado un valor mayor que el límite de la línea base de 75° , a causa de la optimización de la curva de datos. Resultados bajo un ajuste de iteración de 0.

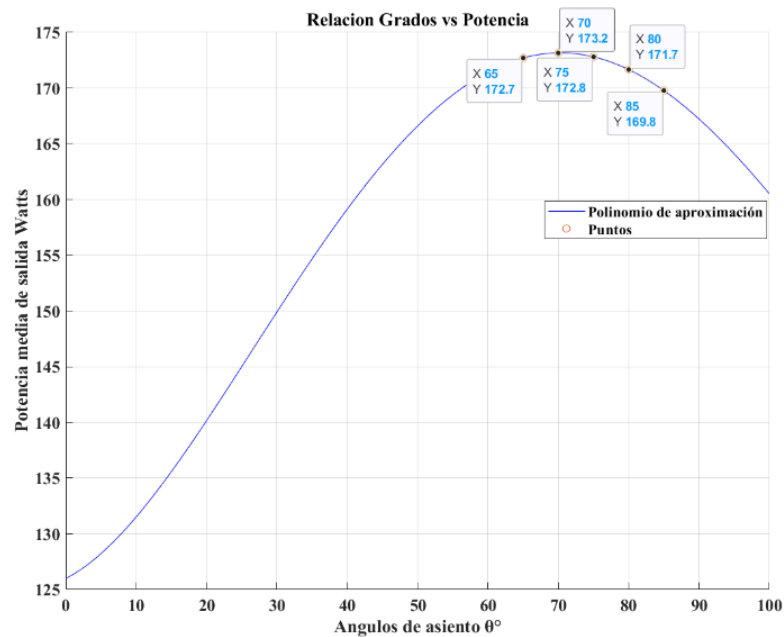


Fig. 21: Relación entre el rango de ángulos de asiento y potencia de salida.

La siguiente curva (Fig. 22) es un acercamiento a la función de la figura 21, indicando los puntos del rango designado con su respectiva intersección a la potencia de salida.

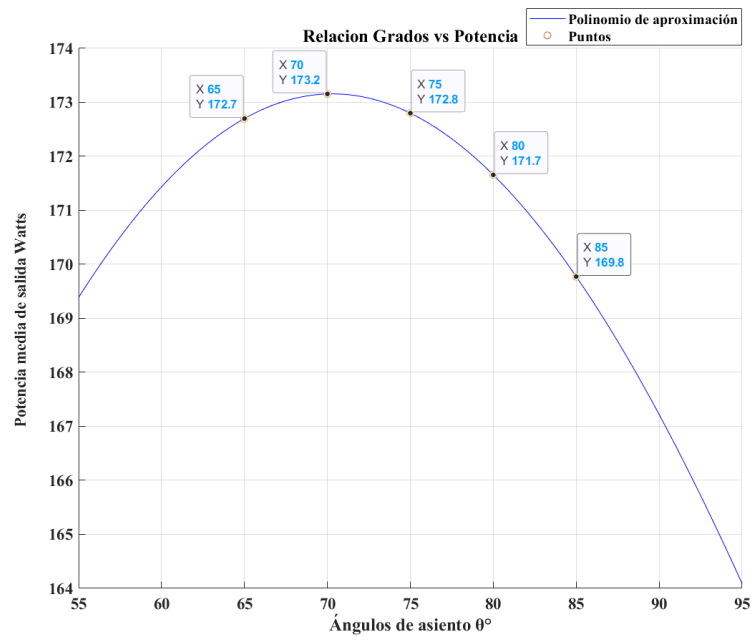


Fig. 22: Aumento a la curva de ángulos de asiento y potencia de salida.

El tiempo de ciclismo es afectado por la fatiga muscular y posición del cuerpo, cuanto más recto (90°) es menor el tiempo que uno puede producir a una velocidad constante.

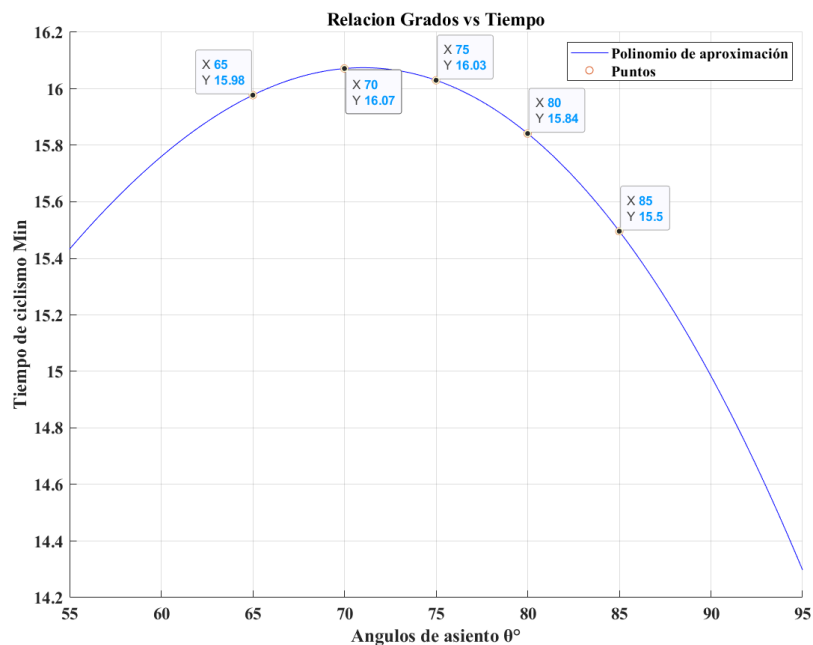


Fig. 23: Curva de la relación de la inclinación del asiento y el tiempo de ciclismo

La tabla 12 recopila los datos establecidos por el rango determinado, la potencia media de salida y su respectivo tiempo de ciclismo, teniendo en cuenta el valor base para desglose de información.

Tabla 12: Relación entre el rango de ángulos del asiento, la potencia de salida y el tiempo de ciclismo

	Ángulo del asiento respecto a la cadera	Potencia media de salida	Tiempo de ciclismo
	65°	172,700 W	15,98 min
	70°	173,155 W	16,07 min
Dato base	75°	172,800 W	16,03 min
	80°	171,657 W	15,84 min
	85°	169,773 W	15,5 min

Dado que, la relación de información es basada en un estudio experimental, esta puede variar respecto a una optimización ideal. Resaltando el valor máximo de potencia media de salida de 173,157W obtenida con el ángulo 70,30°; y el ángulo que ejerce mayor tiempo de ciclismo en 16,074 min es 71°. Esta información se ve alterada debido a la aproximación decimal, así como la igualdad de condiciones de manejo y pruebas realizadas en laboratorio. Es por ello, el ángulo base para el diseño será de 75°, como punto medio del rango seleccionado; los demás valores serán puntos de gradación a elección de reclinación del piloto. Es así, la información basada de acuerdo al artículo de Goswami et al [39, p. 27], se indica que el ángulo de respaldar respecto a la horizontal del asiento preferente varía entre los 105° y 108°; ángulo complementario al ángulo de cadera respecto a la horizontal de 75°; es también; la inclinación del asiento la cual debe variar entre 25° y 26°; generando un mayor torque disminuyendo la fatiga.

Modelado en software

Para el modelado o diseño en el software SOLIDWORKS se dibuja mediante, acotaciones y líneas guías como referencia de ubicación, tanto, del piloto, como la línea del marco.

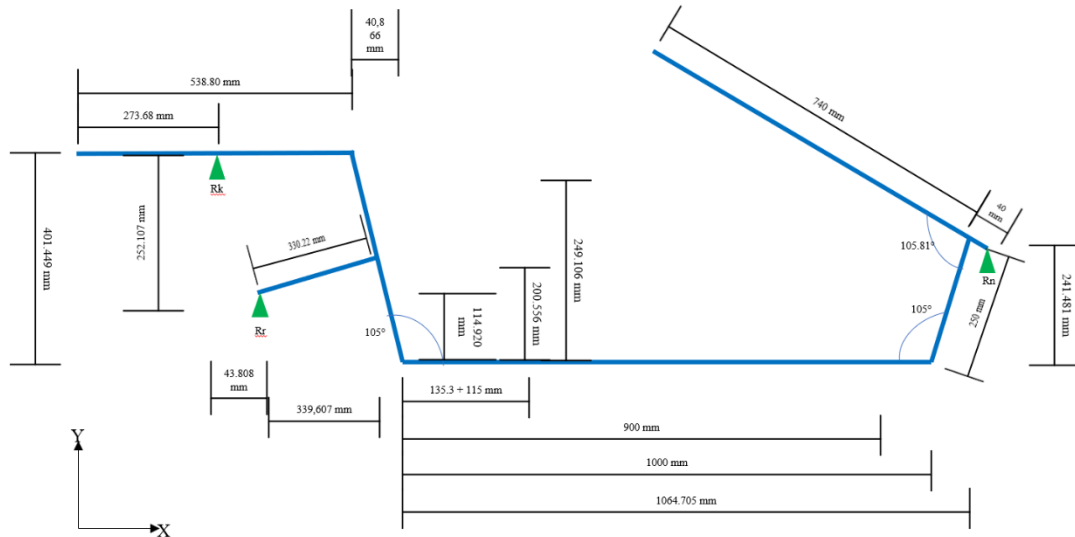


Fig. 24: Acotaciones en mm y líneas guía para el modelo del marco

Elaborando la forma en CAD 3D siguiendo la referencia de los bosquejos realizados en apartados anteriores. Siendo el concepto de diseño el representado en la figura 25. Este sistema cuenta con piezas desmontables, mediante seguros de grapas; así como sistemas de pasadores, bisagras, tuercas y tornillos; para las aperturas de mecanismos y subensamblajes.

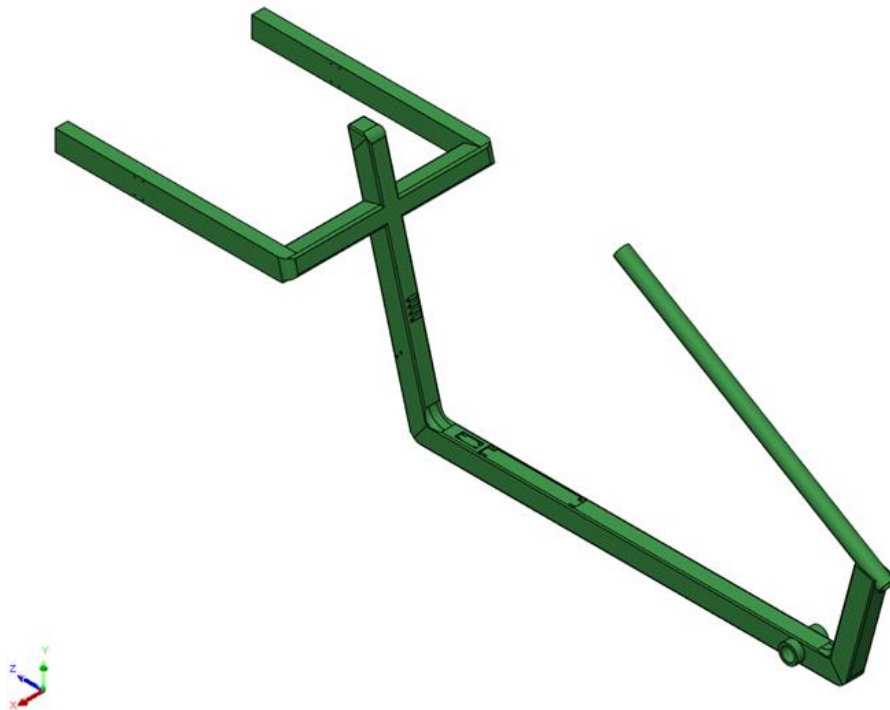


Fig. 25: Concepto de modelado CAD

El sistema del marco presenta un perfil rectangular redondeado hueco con valor $50 \times 40 \times 3$ e interior de 25×20 (medidas en mm), siendo todas las medidas desarrolladas en milímetros, el cual domina la estructura principal.

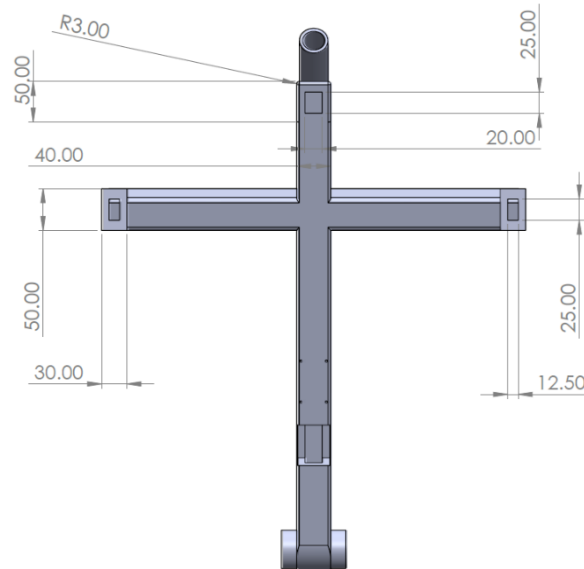


Fig. 26: Vista del perfil rectangular del marco

De igual forma, el perfil circular hueco que guía a la horquilla de la rueda delantera se define acorde a las medidas del perfil estándar de 33,7 mm de diámetro con espesor de 4 mm.

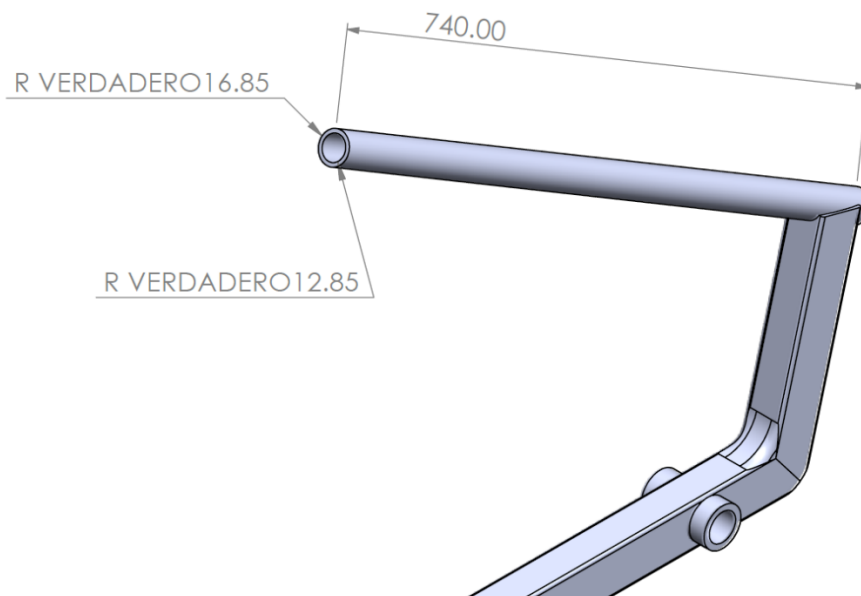


Fig. 27: Vista del perfil circular del tubo guía

Se plantearon uniones mediante grapas a sujeción, pasadores, bisagra, tuerca y tornillo; para mantener fijos algunos subsistemas del marco del vehículo; tales como el canal deslizante del asiento, la articulación del respaldo, el sistema de amortiguación, rótula y diferencial mediante transmisión de cadena – piñón.



Fig. 28: Vista explosionada con subsistemas

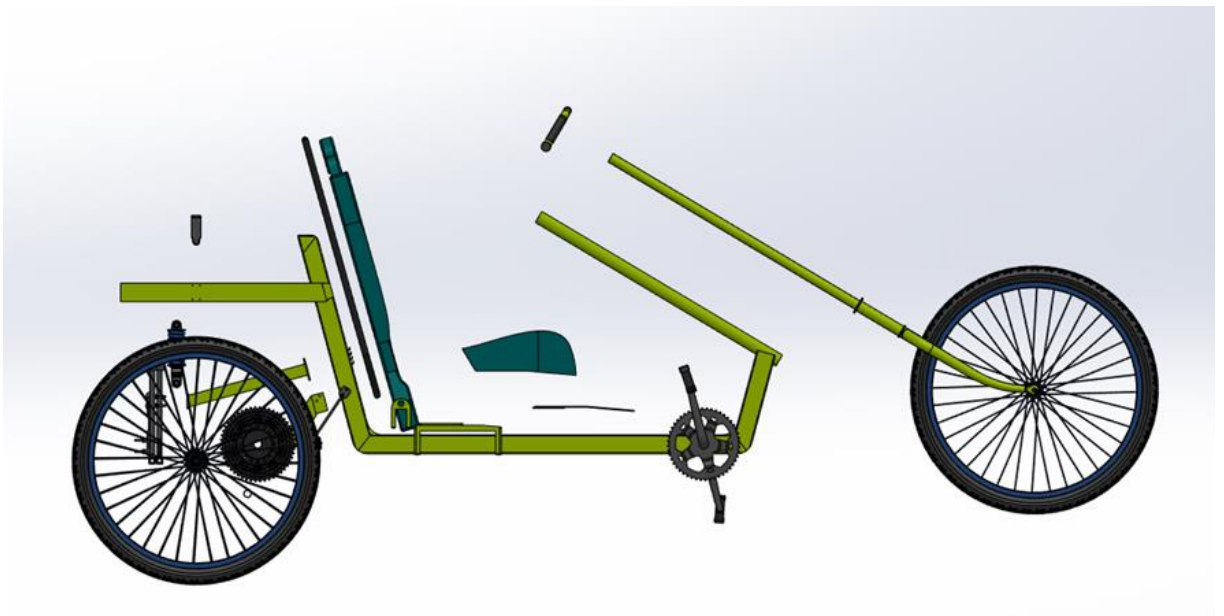


Fig. 29: Vista explosionada incluyendo la totalidad del marco

Siendo en conjunto la siguiente imagen, el ensamblaje del vehículo de potencia humana.



Fig. 30: Representación isométrica coloreada CAD

De manera más realista, se ha realizado renderizado al modelo CAD.



Fig. 31: Representación renderizada isométrica CAD

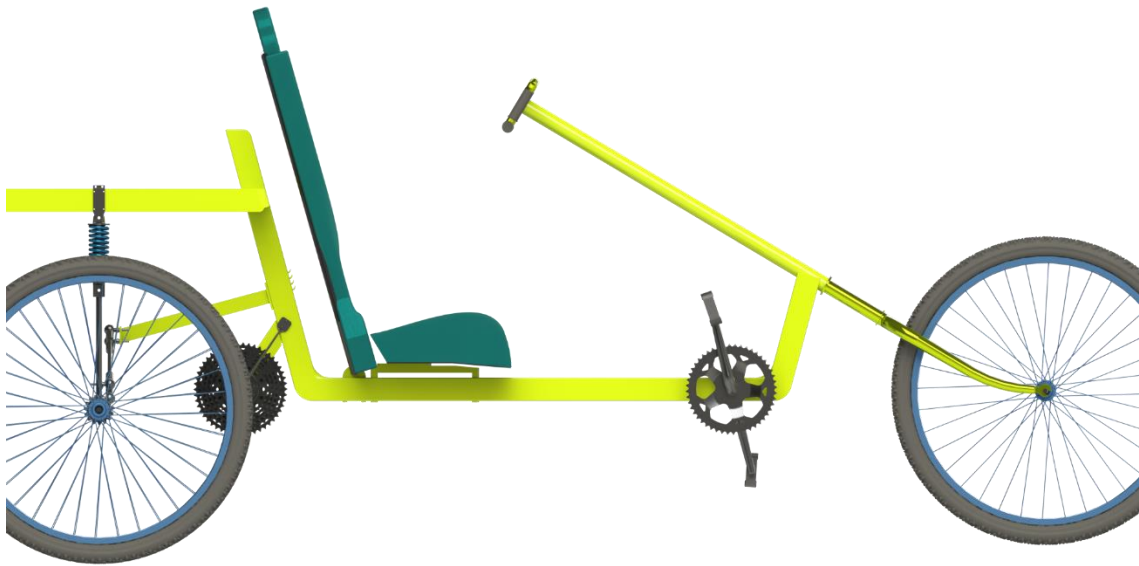


Fig. 32: Representación en vista lateral CAD

Asimismo, los elementos que lo conforman, definidas como piezas genéricas tales como, la suspensión, la transmisión, bielas, pedales, manillar y frenos; serán consideradas bajo instrumentos estandarizados y comerciales, junto a sus materiales que los comprenden; siendo de baja densidad, y por ende livianos, que aporten al sistema en general.

Análisis estático

Para desarrollar el análisis estático del sistema se debe partir por los materiales a utilizar y sus propiedades mecánicas. Para ello, se ha escogido un material compuesto, el cual comprende a la resina poliéster y a la fibra de vidrio tipo S; ambos, materiales de baja densidad y utilizados actualmente en diversas aplicaciones.

La matriz o unión de estos materiales se efectúa mediante el *pegado* de capas, consistente en procesos de difusión de moléculas de ambos componentes [40]. Es decir, en los plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV) las propiedades dependen de la cantidad de fibras existentes en el compuesto, aumentando y mejorando las propiedades del material [40].

Asimismo, este tipo de compuestos presentan diversas ventajas y aplicables a este contexto, tales como la alta resistencia a la corrosión, resistencia a cargas de impacto y mayor módulo elástico que otros materiales; sin embargo, también presenta desventajas

que pueden limitar la trayectoria del proyecto, como son los altos costos de fabricación, mayor complejidad de obtener las propiedades mecánicas deseadas [40, p. 12].

Materiales a utilizar

La matriz a utilizar es a partir de los materiales resina poliéster y fibra de vidrio tipo S.

- **Resina Poliéster:** Es el tipo de resina termorresistente y de menor costo, cuenta con gran facultad de moldeo y maniobrabilidad.
 - Fundición de resina poliéster rígida: Utilizado en estructuras laminadas, tuberías, barcos, cabinas de vehículos pesados, cañas de pesca, entre otras aplicaciones [41].

En la siguiente tabla (Tabla 12) se presenta la información de propiedades físicas y mecánicas de la resina a utilizar en la matriz, así como la energía para producirla, la huella de carbono y el consumo de agua.

Tabla 13: Propiedades del material Fundición de resina Poliéster rígida

PARÁMETROS	MIN	MAX	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS			
Densidad	1,04e3	1,4e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Módulo de Young	2,07	4,41	GPa
Límite elástico	33	40	MPa
Módulo de flexión	3,37	4,19	GPa
Módulo de ruptura	75	159	MPa
Ratio de Poisson	0,381	0,403	
PRECIO			
Precio	12,6	14,1	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA			
Energía incorporada	67,9	74,8	MJ/kg
Huella de carbono	2,41	2,66	kg/kg
Consumo de agua	190	210	l/kg

Fuente: CES EduPack [41]

- **Fibra de vidrio tipo S:** o S – glass, posee un gran comportamiento a la fatiga y alto módulo de rigidez, sin embargo, frente a los otros tipos de vidrio, es de alto costo [40, p. 14].
 - Fibra de vidrio de grado S: se utiliza típicamente como refuerzo, en forma de fibras individuales o hilos, así como planchas tejidas [42]

De igual forma, se presentan las propiedades físicas y mecánicas, y el consumo energético para producirlo, así como la contaminación producida en su fabricación.

Tabla 14: Propiedades del material Fibra de vidrio de grado S

PARÁMETROS	MIN	MAX	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS			
Densidad	2,49e3	2,5e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Módulo de Young	86	93	GPa
Límite elástico	3,75e3	4,09e3	MPa
Módulo de flexión	86	93	GPa
Módulo de ruptura	4,5e3	4,9e3	MPa
Ratio de Poisson	0,21	0,23	
PRECIO			
Precio	63,9	107	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA			
Energía incorporada	49,3	54,3	MJ/kg
Huella de carbono	2,85	3,14	kg/kg
Consumo de agua	281	311	l/kg

Fuente: CES EduPack [42]

Estos materiales se unen en una matriz isotrópica, debido la propiedad mecánica de presentar infinitos planos de simetría, mostrando sus diferentes propiedades de manera independiente a la orientación en que se aplique algún esfuerzo. Es, por tanto, el uso de solo dos constantes necesarias de las propiedades elásticas, el módulo de Young y al límite elástico, no obstante, se pueden utilizar otros pares de variables relacionadas entre sí [43, p. 24].

Mediante el apartado de sintetizador del software CES EduPack 2019, se han combinado ambos materiales en una matriz isotrópica lineal, en una configuración de 7 capas con un espesor de 10 mm. Esta matriz o unión presenta una relación de propiedades propias del sistema.

Tabla 15: Propiedades del material sintetizado

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS		
Densidad	2,36e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Módulo de Young	80,8	GPa
Límite elástico	972	MPa
Módulo de flexión	79,6	GPa
Módulo de ruptura	638	MPa
Ratio de Poisson	No definido	

PRECIO		
Precio	79	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA		
Energía incorporada	52,7	MJ/kg
Huella de carbono	2,97	kg/kg
Consumo de agua	No definido	l/kg

Fuente: CES EduPack [44]

El registro se da en 7 capas según la siguiente configuración:

Tabla 16: Registro del material y configuración

CAPA	MATERIAL	ESPESOR
Capa 7	Fundición de resina poliéster rígida	0,25 mm
Capa 6	Fibra de vidrio de grado S	3,00 mm
Capa 5	Fundición de resina poliéster rígida	0,25 mm
Capa 4	Fibra de vidrio de grado S	3,00 mm
Capa 3	Fundición de resina poliéster rígida	0,25 mm
Capa 2	Fibra de vidrio de grado S	3,00 mm
Capa 1	Fundición de resina poliéster rígida	0,25 mm

Fuente: CES EduPack [44]

Análisis teórico de cargas y esfuerzos sobre el chasis

En el desarrollo de un análisis estático se debe verificar bajo que esquema de cargas estará expuesto el sistema a evaluar; en el caso presente, los esfuerzos actuantes han sido de tracción y compresión.

Asimismo, el material PRFV, se constituye por la fibra de vidrio tipo S, el cual por sí solo es un material frágil; y un material matriz, fundición de resina poliéster rígida como refuerzo; que de acuerdo a la manufactura poseerá características frágiles o dúctiles. Por ello, para determinar el factor de diseño de acuerdo al tipo de material, se selecciona como base, un factor de valor “4,0”, correspondiente al diseño de estructuras con incertidumbre de cargas, propiedades de materiales, además de un deseo de seguridad adicional [45].

De acuerdo con los datos establecidos por la tabla de propiedades del material:

- Factor de diseño: $N = 4,0$
- Límite o esfuerzo normal de diseño: $\frac{972 \text{ MPa}}{4,0} = 243 \text{ MPa}$

La información definida por las propiedades del material compuesto es basada en la configuración de capas y su registro, por tanto, se diseñaron perfiles huecos que puedan cumplir con la estructura del chasis del vehículo.

- Perfil rectangular hueco : 50 x 40 / 25 x 20 (medidas en mm)
- Perfil rectangular hueco : 50 x 30 / 25 x 12,5 (medidas en mm)
- Perfil circular hueco : $Re = 16,85 \wedge Rin = 12,85$ (medidas en mm)

Seguidamente, para definir el diagrama de cuerpo libre del sistema, se han planteado las cargas o pesos, según la antropometría de una persona [46] de 70 kg y con una estatura de 1,70 m; adicionando como factor de tolerancia el 5% sobre el total.

Tabla 17: Datos de masa en distribución porcentual del cuerpo humano

DATOS DE MASA			
DISTRIBUCION PORCENTUAL DE MASA			
Partes del cuerpo humano [46]	Porcentaje [46]	Masa en 70 kg	Masa aumentada 5% = 73,5 kg
Cabeza	7,0%	4,900	5,145
Tronco	43,0%	30,100	31,605
Todo el brazo	6,5%	4,550	4,778
Parte superior de brazo	3,5%	2,450	2,573
Antebrazo	2,3%	1,610	1,691
Mano	0,8%	0,560	0,588
Toda la pierna	18,5%	12,950	13,598
Fémur	11,6%	8,120	8,526
Parte inferior pierna	5,3%	3,710	3,896
Pie	1,8%	1,260	1,323

Fuente: Adaptado de [46]

Las cargas, considerando la gravedad con valor $9,81 \text{ m/s}^2$, se plantearon en el sistema de chasis de la siguiente manera:

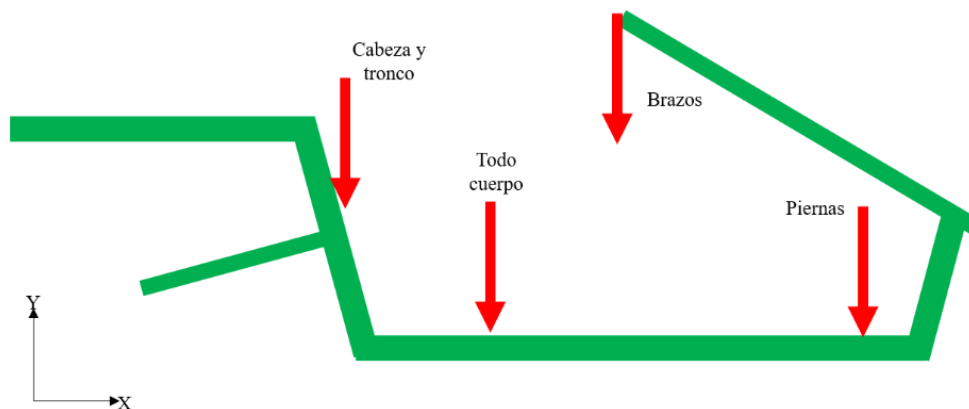


Fig. 33: Planteamiento de cargas en el sistema

Del mismo modo, el planteamiento de cotas de acuerdo al diagrama unifilar de cargas, ubicando las reacciones en puntos críticos, es decir, puntos donde existen apoyos o transición de estos, manteniendo la estructura del chasis en equilibrio. Siendo: **R_n** (reacción normal basada en el apoyo del sistema horquilla y rueda delantera), **R_k**, (punto de reacción del amortiguador o resorte) y **R_r** (reacción resultante del sistema de rotulas).

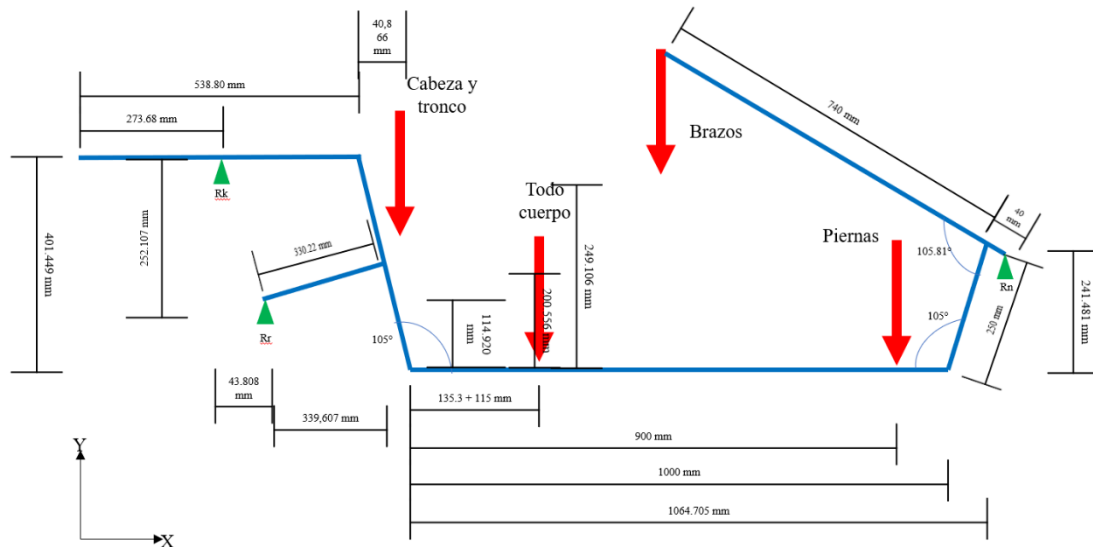


Fig. 34: Diagrama unifilar del sistema

El análisis estático teórico se resolvió dividiendo el sistema en partes, pues de forma referencial son las reacciones anteriormente descritas, y de acuerdo a la fracción por analizar, éstas pueden variar de acuerdo al nuevo diagrama de cuerpo libre.

- **PRIMER SEGMENTO:**

Como primer elemento, se analizó la barra inferior del chasis y su elevación (segmento ABC), la cual conecta directamente al componente que sería el tubo guía de la horquilla delantera, donde existirá una reacción de apoyo (punto C).

Los pesos aplicados sobre esta parte son la masa total del cuerpo y la carga resultante de las piernas sobre el punto que convergen en el eje de los pedales.

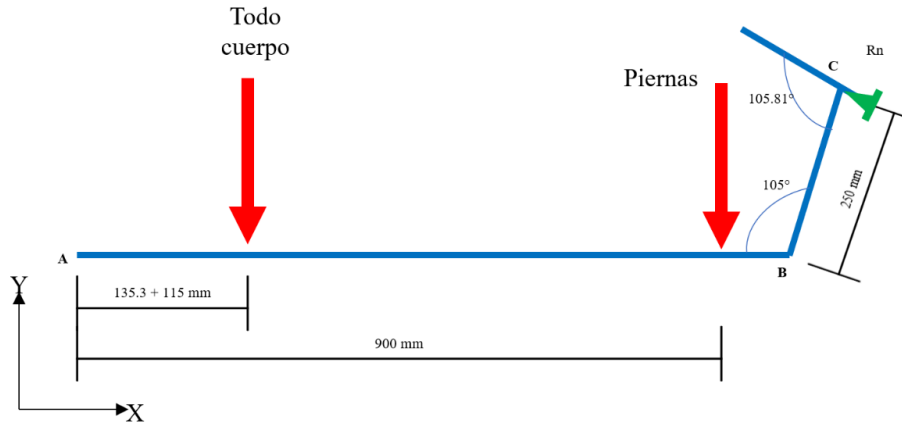


Fig. 35: Planteamiento de cargas en segmento ABC del chasis

La descomposición de ángulos se realizó de la siguiente manera, obteniendo:

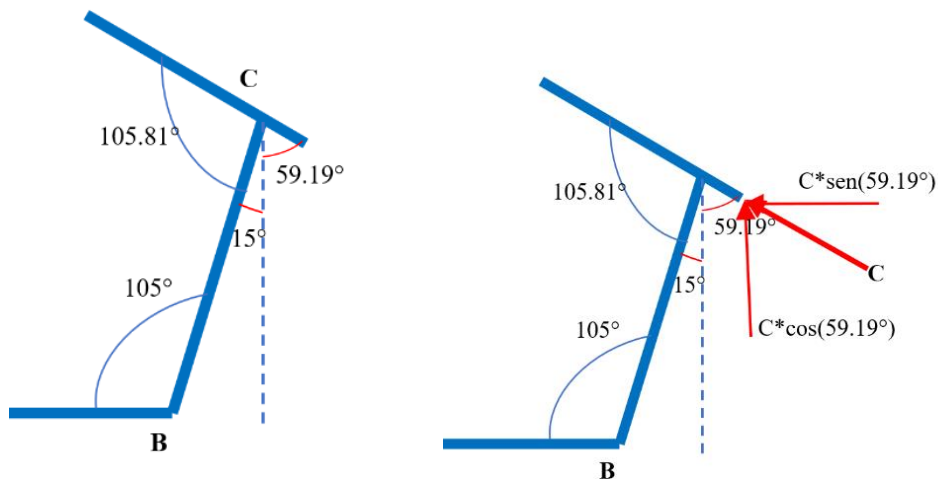


Fig. 36: Descomposición de fuerzas en el punto C

Cálculo de reacciones.

Datos:

- Cargas aplicadas:
 - Todo el cuerpo en el asiento del vehículo: 73,5 kg → 721,035 N
 - Ambas piernas sobre la posición de los pedales: 27,195 kg → 266,783 N

$$\Sigma M_A = 0$$

$$C \cdot \text{sen}(59,19^\circ) \cdot [241,481] + C \cdot \text{cos}(59,19^\circ) \cdot [1064,705] - 721,035 \cdot (135,3 + 115) - 266,783 \cdot (900) = 0$$

$$C \cdot [241,481 \sin(59,19^\circ) + 1064,705 \cdot \cos(59,19^\circ)] - 721,035 \cdot (135,3 + 115) - 266,783 \cdot (900) = 0$$

$$C = \frac{721,035 \cdot (135,3 + 115) + 266,783 \cdot (900)}{[241,481 \sin(59,19^\circ) + 1064,705 \cdot \cos(59,19^\circ)]}$$

$$C = 558,735 \text{ N}$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$A_x - 558,735 \cdot \sin(59,19^\circ) = 0$$

$$A_x = 479,881 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$A_y + 558,735 \cdot \cos(59,19^\circ) - 721,035 - 266,783 = 0$$

$$A_y = 701,638 \text{ N}$$

Cálculo de esfuerzos.

Datos:

- Áreas de perfiles [A]:
 - **Perfil rectangular hueco** : $A = BH - (bh)$
 - **Perfil circular hueco**: $\pi (Re^2 - Rin^2)$
 - Perfil rectangular hueco : $50 \times 40 / 25 \times 20 \rightarrow 50 \cdot 40 - (25 \cdot 20) = 1500 \text{ mm}^2$
 - Perfil rectangular hueco : $50 \times 30 / 25 \times 12,5 \rightarrow 50 \cdot 30 - (25 \cdot 12,5) = 1187,5 \text{ mm}^2$
 - Perfil circular hueco : $Re = 16,85 \wedge Rin = 12,85 \rightarrow \pi (16,85^2 - 12,85^2) = 373,221 \text{ mm}^2$
- Momentos de inercia [I]:
 - **Perfil rectangular hueco**: $\frac{1}{12} (B \cdot H^3 - b \cdot h^3)$
 - **Perfil circular hueco** : $\frac{\pi}{4} (Re^4 - Rin^4)$
 - Perfil rectangular hueco : $50 \times 40 / 25 \times 20 \rightarrow \frac{1}{12} (40 \cdot 50^3 - 20 \cdot 25^3) = 390625 \text{ mm}^4$

- Perfil rectangular hueco : $50 \times 30 / 25 \times 12,5 \rightarrow \frac{1}{12}(30 \cdot 50^3 - 12,5 \cdot 25^3) = 296223,9583 \text{ mm}^4$
- Perfil circular hueco : $Re = 16,85 \wedge Rin = 12,85 \rightarrow \frac{\pi}{4}(16,85^4 - 12,85^4) = 41898,27925 \text{ mm}^4$
- Distancia desde el centroide [c]:
 - **Perfil rectangular hueco** : $\frac{1}{2}(H - h)$
 - **Perfil circular hueco** : $\frac{1}{2}(De - Din)$
 - Perfil rectangular hueco : $50 \times 40 / 25 \times 20 \rightarrow \frac{1}{2}(50 - 25) = 12,5 \text{ mm}$
 - Perfil rectangular hueco : $50 \times 30 / 25 \times 12,5 \rightarrow \frac{1}{2}(50 - 25) = 12,5 \text{ mm}$
 - Perfil circular hueco : $Re = 16,85 \wedge Rin = 12,85 \rightarrow \frac{1}{2}[(16,85 \cdot 2) - (12,85 \cdot 2)] = 4 \text{ mm}$

Determinación de esfuerzos mínimos y máximos.

$$M_X = 0 \quad M_Z = W_{X1} \quad \tau = 0$$

$$\sigma = \frac{-\omega}{A} - \frac{M_Z c}{I}$$

$$\sigma = \frac{-721,035}{1500} - \frac{266,783}{1500} - \frac{721,035 \cdot (135,3 + 115) \cdot 12,5}{390625} - \frac{266,783 \cdot (900) \cdot (12,5)}{390625} + \left[\frac{558,735 \cdot \cos(59,19^\circ)}{1500} + \frac{558,735 \cdot \cos(59,19^\circ) \cdot (1064,705) \cdot (12,5)}{390625} \right] - \left[\frac{558,735 \cdot \sin(59,19^\circ)}{1500} + \frac{558,735 \cdot \sin(59,19^\circ) \cdot (241,48) \cdot (12,5)}{390625} \right]$$

$$\sigma = -8,20413 \text{ N/mm}^2 \rightarrow -8,20413 \text{ MPa}$$

Esfuerzos mínimos y máximos

$$\sigma_X = 0; \quad \sigma_Y = \sigma = -8,20413 \text{ MPa} \quad \tau_{XY} = 0$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} = 0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} = -8,20413 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} = 4,10206 \text{ N/mm}^2$$

•SEGUNDO SEGMENTO:

El segundo elemento es referente al tubo circular hueco que servirá de guía a la horquilla de la rueda delantera. El peso aplicado sobre este segmento es el resultante de la masa de los brazos y manos.

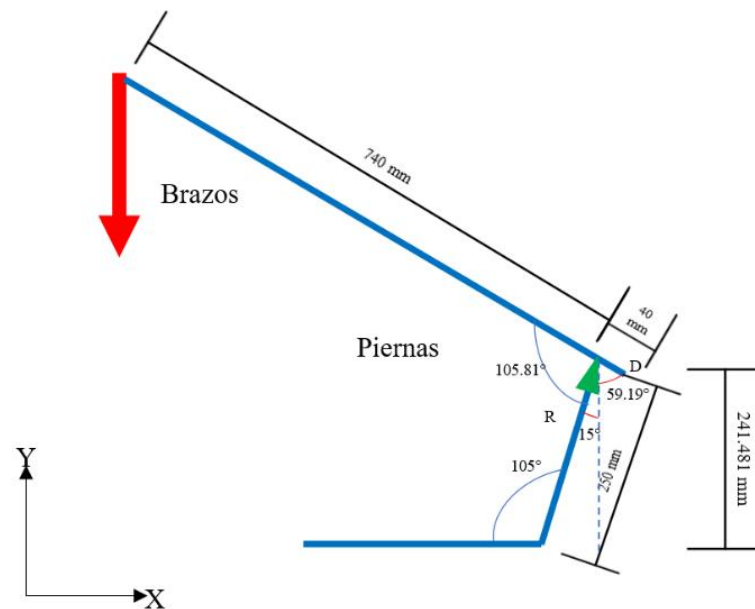


Fig. 37: Descomposición de fuerzas en el punto D

Cálculo de reacciones.

Datos:

•Cargas aplicadas:

•Carga de los brazos: 9,555 kg \rightarrow 93,73455 N

$\Sigma M_D = 0$

$$93,73455 \cdot 740 \cdot \cos(30,81^\circ) + R \cdot \cos(15^\circ) \cdot (40 \cdot \sin(59,19^\circ) - R \cdot \sin(15^\circ) \cdot (40 \cdot \cos(59,19^\circ)) = 0$$

$$R = \frac{-93,73455 \cdot 740 \cdot \cos(30,81^\circ)}{[\cos(15^\circ) \cdot 40 \cdot \sin(59,19^\circ) - \sin(15^\circ) \cdot 40 \cdot \cos(59,19^\circ)]}$$

$$R = -2136,68962 \text{ N}$$

$$\Sigma F_X = 0$$

$$R \cdot \sin(15^\circ) - D_X = 0$$

$$-D_X = 2136,68962 \cdot \sin(15^\circ)$$

$$D_X = -553,016 \text{ N}$$

$$\Sigma F_Y = 0$$

$$-93,73455 + R \cdot \cos(15^\circ) - D_Y = 0$$

$$-93,73455 + (-2136,68962) \cdot \cos(15^\circ) - D_Y = 0$$

$$D_Y = 2157,618 \text{ N}$$

Determinación de esfuerzos mínimos y máximos – Perfil circular.

$$M_X = 0 \quad M_Z = W_{X2} \quad \tau = 0$$

$$\sigma = \frac{-93,73455}{373,221} + \frac{2157,618}{373,221} - \frac{553,016}{373,221} + \frac{93,73455 \cdot 740 \cdot \cos(30,81^\circ) \cdot 4}{41898,27925} + \frac{2157,618 \cdot 40 \cdot \sin(59,19^\circ) \cdot 4}{41898,27925} - \frac{553,016 \cdot 40 \cdot \cos(59,19^\circ) \cdot 4}{41898,27925}$$

$$\sigma = 15,73042 \text{ N/mm}^2$$

Esfuerzos mínimos y máximos

$$\sigma_X = 0; \quad \sigma_Y = \sigma = 15,73042 \text{ MPa} \quad \tau_{XY} = 0$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} = 0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} = 15,73042 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{XY}^2} = 7,86521 \text{ N/mm}^2$$

•TERCER SEGMENTO:

El tercer segmento abarca reacciones de tipo elástica y un sistema de rotulas, además de considerar la parte del respaldar del chasis del vehículo de potencia humana, la cual soporta la carga de la cabeza y tronco de la persona.

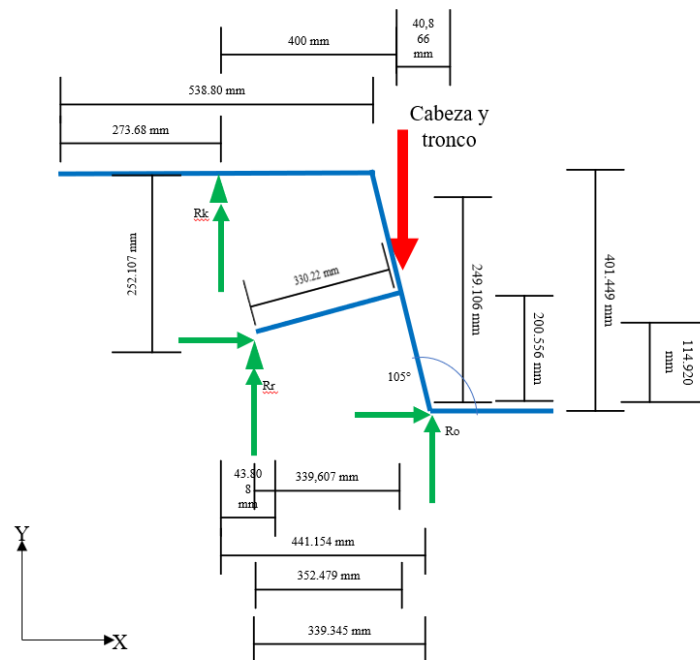


Fig. 38: Planteamiento de cargas y distancias en segmento Rk-Rr-Ro del chasis

Cálculo de reacciones.

Datos:

•Cargas aplicadas:

- Carga de la cabeza y tronco: 31,605 kg \rightarrow 310,04505 N

$$\Sigma M_{Rk} = 0$$

$$-310,04505 \cdot (400) + R_r \cdot \text{sen}(15^\circ) \cdot 43,808 + R_r \cdot \text{cos}(15^\circ) \cdot 252,107 + R_o \cdot \text{sen}(75^\circ) \cdot 441,154 - R_o \cdot \text{cos}(75^\circ) \cdot 441,449 = 0$$

$$-124018,02 + R_r[43,808 \cdot \text{sen}(15) + 252,107 \cdot \text{cos}(15^\circ)] + R_o[441,154 \cdot \text{sen}(75^\circ) - 401,449 \cdot \text{cos}(75^\circ)] = 0$$

$$-124018,02 + R_r \cdot [254,855] + R_o \cdot [322,219] = 0$$

$$R_k \cdot [0] + R_o \cdot [322,219] + R_r \cdot [254,855] = 124018,02$$

$$\Sigma M_{Rr} = 0$$

$$-R_k \cdot (43,808) - 310,04505 \cdot (352,479) + R_o \cdot \text{sen}(75^\circ) \cdot 339,345 - R_o \cdot \text{cos}(75^\circ) \cdot 114,920 = 0$$

$$-R_k \cdot [43,808] - 109284,3692 + R_o \cdot [339,345 \cdot \text{sen}(75^\circ) - 114,920 \cdot \text{cos}(75^\circ)] = 0$$

$$-R_k \cdot [43,808] + R_o \cdot [298,039] + -R_r \cdot [0] = 109284,3692$$

$$\Sigma M_{Ro} = 0$$

$$-R_k \cdot (441,154) + 310,04505 \cdot (40,866) - R_r \cdot \text{sen}(15^\circ) \cdot 339,345 - R_r \cdot \text{cos}(15^\circ) \cdot 114,920 = 0$$

$$-R_k \cdot (441,154) + 12670,30101 - R_r [339,345 \cdot \text{sen}(15^\circ) + 114,92 \cdot \text{cos}(15^\circ)] = 0$$

$$-R_k \cdot [441,154] + 12670,30101 - R_r [198,833] = 0$$

$$-R_k \cdot [441,154] + R_o \cdot [0] - R_r [198,833] = -12670,3010$$

Estableciendo un sistema de ecuaciones lineales con tres incógnitas

Matriz

R_k	R_o	R_A	Constante
0	322,219	254,855	12408,02
-43,808	298,039	0	109284,3692
-441,155	0	-198,833	-12670,30101

Resolviendo la matriz, se obtienen los valores de las variables:

$$R_k = 20,021 \text{ N}$$

$$R = 369,621 \text{ N}$$

$$R_r = 19,302 \text{ N}$$

Simulación análisis estático

Para el desarrollo del análisis estático es debido precisar de manera individual el valor de masa de cada componente de acuerdo al material seleccionado según información de uso comercial (tabla 18). De esta forma, conocer la masa total del vehículo, la cual es 23,199 kg y analizar que cargas deben considerarse en el análisis a ejecutar.

En la siguiente imagen, se encuentran indicadas las partes de lo que conforman el vehículo de potencia humana – triciclo delta.

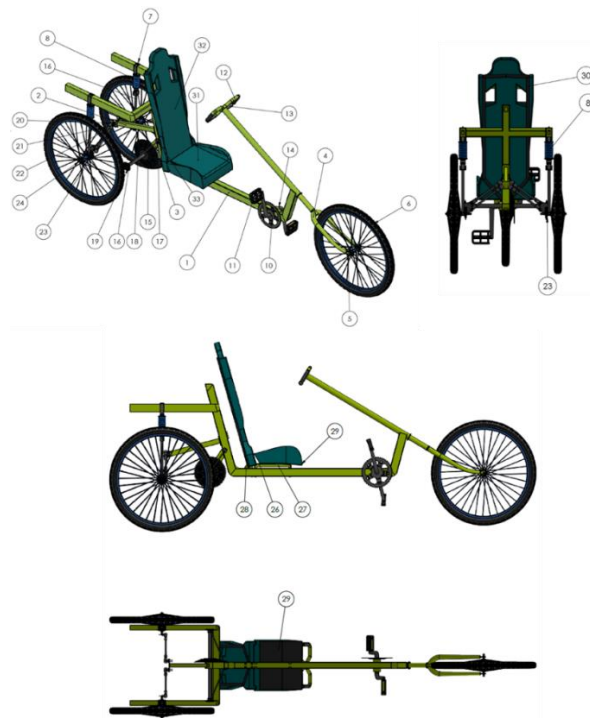


Fig. 39: Numeración de partes que conforman el HPV

Tabla 18: Componentes utilizados en el sistema y sus masas

NUM.	PIEZA / COMPONENTE	MATERIAL	CANTIDAD	MASA (g)	MASA (kg)	MASA TOTAL (g)
1	Marco Estructural	PRFV	1	11322,36	11,32236	11322,36
2	Soporte de rotula	PRFV	1	220,79	0,22079	220,79
3	Soporte de casete	PRFV	1	574,28	0,57428	574,28
4	Horquilla	Aluminio Aleación 6061	1	781,28	0,78128	781,28
5	Pasador de rueda delantera	Aluminio Aleación 6061	1	29,69	0,02969	29,69
6	Rueda (Llanta y Caucho)	Aluminio Aleación 6061 Caucho natural	3	1049,81	1,04981	3149,43

7	Grapas de amortiguador	Aluminio Aleación 6061	4	15,76	0,01576	63,04
8	Amortiguador	Acero de baja aleación PVC Goma Natural Acero de alto carbono	2	856,27	0,85627	1712,54
9	Soporte amortiguador	Acero de baja aleación Fe/<1.0 C/<2.5 Cr/<2.5 Ni/<2.5 Mo/<2.5 V	2	214,57	0,21457	429,14
10	Piñón delantero conductor	Aluminio 7075-T6	1	629,43	0,62943	629,43
11	Pedales	PVC	2	95,10	0,0951	190,2
12	Manubrio	Aluminio Aleación 6061	1	187,20	0,1872	187,2
13	Goma de manubrio	Caucho natural	4	4,90	0,0049	19,6
14	Rodamientos	Acero de baja aleación Fe/<1.0 C/<2.5 Cr/<2.5 Ni/<2.5 Mo/<2.5 V	2	8,91	0,00891	17,82
15	Casete de cambios	Aluminio 7075 - T6	1	573,38	0,57338	573,38
16	Rotula 1	AISI 304	8	31,53	0,03153	252,24
17	Rotula 2	AISI 304	8	58,40	0,0584	467,2
18	Rotula guía	AISI 304	4	85,64	0,08564	342,56
19	Guía de piñones diferenciales	Aluminio Aleación 6061	1	69,96	0,06996	69,96
20	Soporte guía piñón 1	Aluminio Aleación 6061	2	4,11	0,00411	8,22
21	Soporte guía piñón 3	Aluminio Aleación 6061	2	12,69	0,01269	25,38
22	Soporte guía piñón 2	Aluminio Aleación 6061	2	7,83	0,00783	15,66
23	Piñón trasero	Aluminio 7075-T6	4	32,62	0,03262	130,48
24	Pasador de rueda trasero	Aluminio Aleación 6061	2	29,69	0,02969	59,38

25	Pasador Soporte piñón	Acero de alto carbono	2	8,25	0,00825	16,5
26	Base de asiento	PRFV	1	75,35	0,07535	75,35
27	Canal de asiento	PRFV	1	252,23	0,25223	252,23
28	Angulo respaldar	PRFV	1	47,81	0,04781	47,81
29	Placa Asiento	Aluminio Aleación 6061	1	540,31	0,54031	540,31
30	Tubo respaldar	Aluminio Aleación 6061	1	335,56	0,33556	335,56
31	Asiento	Espuma baja densidad	1	295,85	0,29585	295,85
32	Respaldar	Espuma baja densidad	1	364,24	0,36424	364,24
TOTAL					23,199	23199,11

Primero, para realizar un análisis estático, y llevar a cabo la ejecución de la simulación; la malla trazada, es debida la verificación de elementos desarrollados, sólidos; señalando que, esta estructura a analizar se divide en tres piezas unidas mediante relaciones de posición representando componentes como pernos o pasadores (Fig. 40); y los parámetros; es la siguiente:

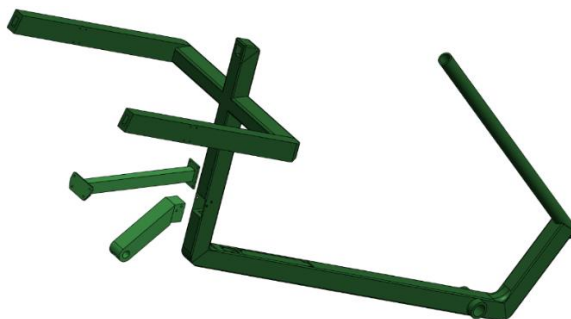


Fig. 40: Vista explosionada de las partes de la estructura a analizar

Tabla 19: Parámetros de mallado

PARÁMETROS	DEFINICIÓN
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos Jacobianos	16 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño max. de elemento	10,1482 mm
Tamaño min. de elemento	0,50741 mm

Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	95,6

La información resultante se ha ajustado a un tamaño máximo de elemento de 10,1482 y un mínimo de 0,50741 mm, con una confiabilidad de 95,6%.

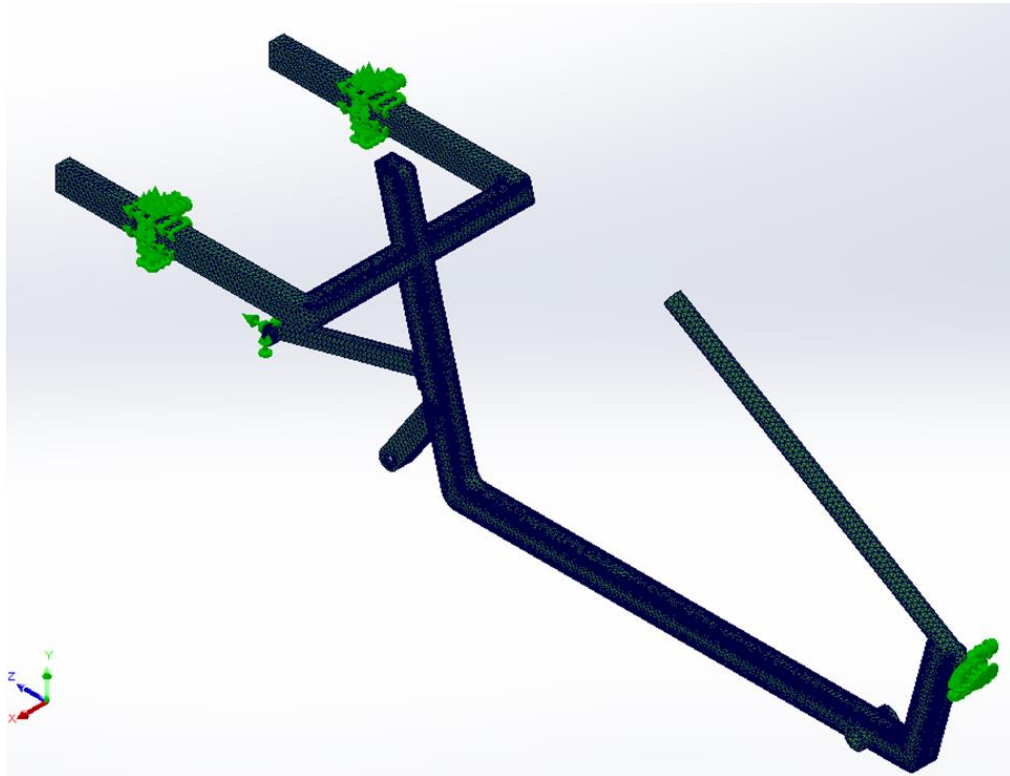


Fig. 41: Mallado basado en curvatura de combinado

Análisis estático - Fuerza de gravedad

Como primer análisis estático, se ha aplicado como única carga, la fuerza de gravedad (9,81 m/s²), la cual va asignada en el plano referente y paralelo a donde se ubica el centro de masa del sistema a estudiar; verificando cómo se afecta el marco o estructura de acuerdo a la geometría diseñada; asimismo cómo actúa el material seleccionado soportándose por sí sólo.

Para ello se han establecido los puntos de sujeción en donde se pretende sostener y establecer respecto a componentes y al suelo el marco y sistema, los cuales son donde van las uniones vinculadas a las ruedas.

Y utilizando el material PFRV sintetizado, se ha ejecutado la simulación de análisis estático sobre el marco de vehículo, obteniéndose la siguiente información.

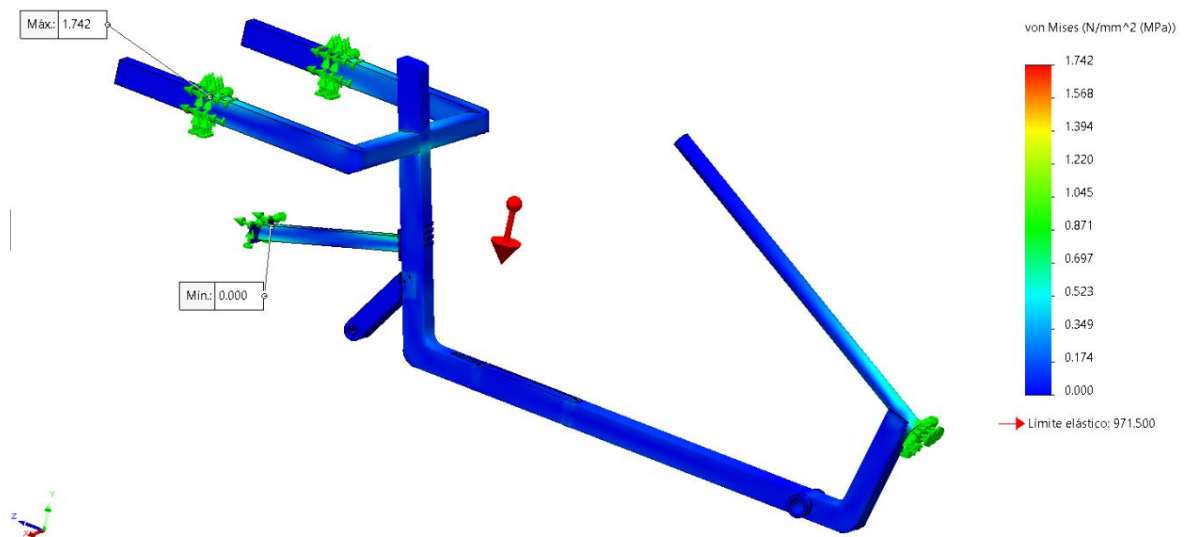


Fig. 42: Representación y gráfica de esfuerzos con carga de fuerza de gravedad al marco en material PRFV

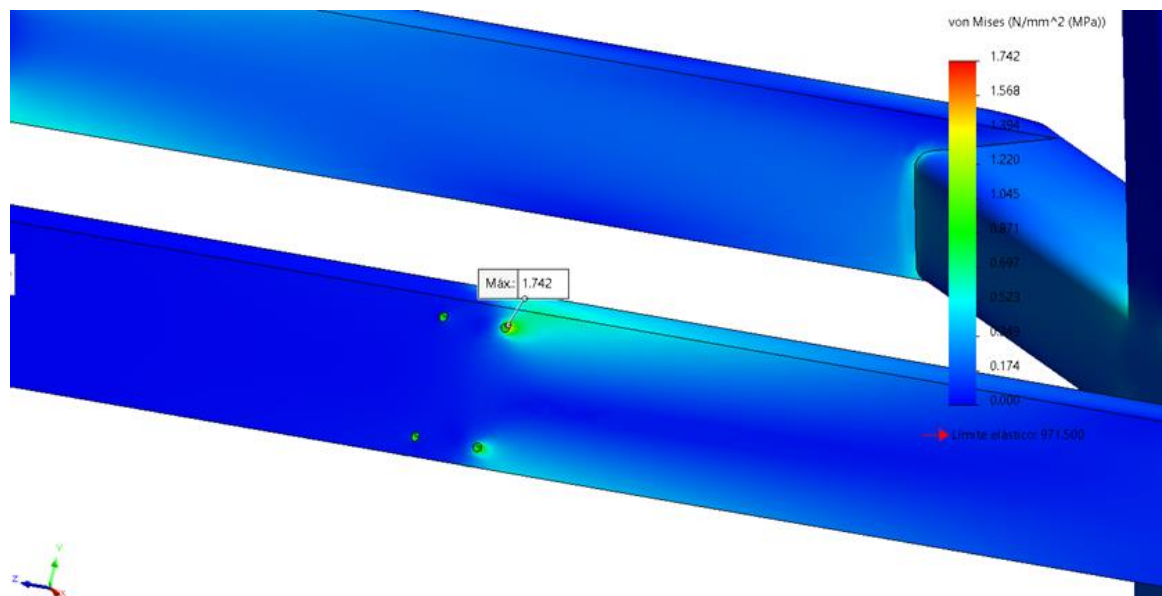


Fig. 43: Punto en donde se ha aplicado el máximo esfuerzo con carga de fuerza de gravedad al marco en material PRFV

Como resultado de la simulación aplicando la fuerza de gravedad, se distingue (Fig. 42, Fig. 43) y respecto a la gráfica rgb, el esfuerzo máximo generado sobre el marco con material sintetizado PRFV con un valor de 1,742 MPa; punto donde se vinculan las grapas de sujeción (pieza 7) de los amortiguadores (pieza 8)

De igual forma, se verifica como actúan las tensiones verticales paralelas al eje de coordenadas Y, siendo el esfuerzo máximo de 0,962 MPa.

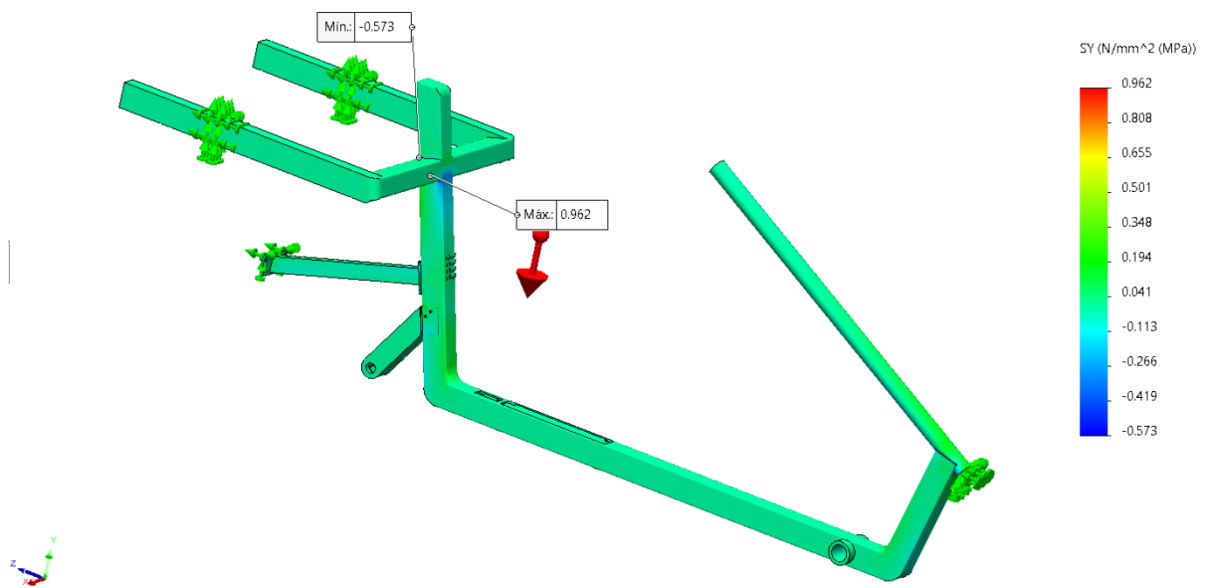


Fig. 44: Tensiones normales respecto al eje Y con carga de fuerza de gravedad al marco en material PRFV

Asimismo, la carga de fuerza de gravedad genera una ligera deformación sobre la estructura de diseño.

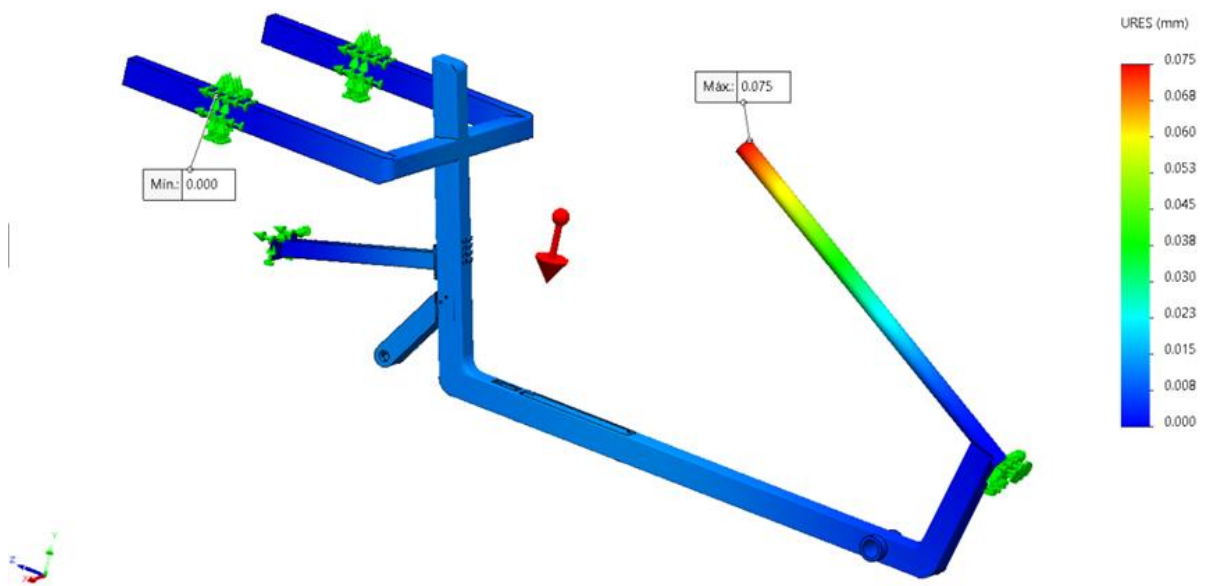


Fig. 45: Desplazamiento en milímetros de la estructura aplicando carga de fuerza de gravedad al marco en material PRFV

Siendo este un desplazamiento máximo de 0,075 mm en la parte del tubo guía de la horquilla

El factor de seguridad obtenido en esta simulación es perceptiblemente de 557,5, sin embargo, se relaciona a que el sistema se encuentra estático y soporta su propia masa estructural.

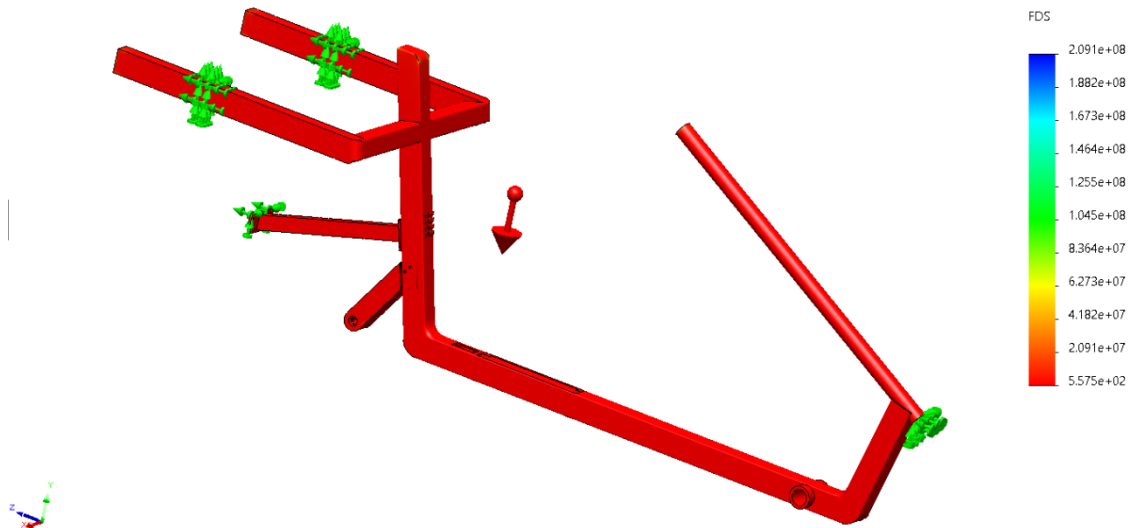


Fig. 46: Grafica y representación del factor de seguridad aplicando carga de fuerza de gravedad al marco en material PRFV

Análisis estático - Material compuesto sintetizado de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio

Para el desarrollo del análisis estático se han definido las cargas que afectan al sistema, considerando la masa de 70 kg de la persona y añadiendo el 5% como tolerancia. Las cargas aplicadas presentes en el sistema son referentes a puntos donde la persona apoyará partes de su cuerpo en el chasis o en el vehículo. Por ello, para la elaboración de la simulación estática se consideró de acuerdo al planteamiento teórico la siguiente configuración y dónde se aplicaron

Tabla 20: Fuerzas establecidas en el vehículo

#	FUERZA	APLICACIÓN EN CHASIS	KG	NEWTONS
1	Masa total del cuerpo	Asiento	70 + 3,5	721,035
2	Cabeza y Tronco	Respaldar	5,145 + 31,605	310,04505
3	Brazos	Manubrio	4,778 + 4,778	93,73455
4	Piernas	Eje de pedales	13,598 + 13,598	266,78295

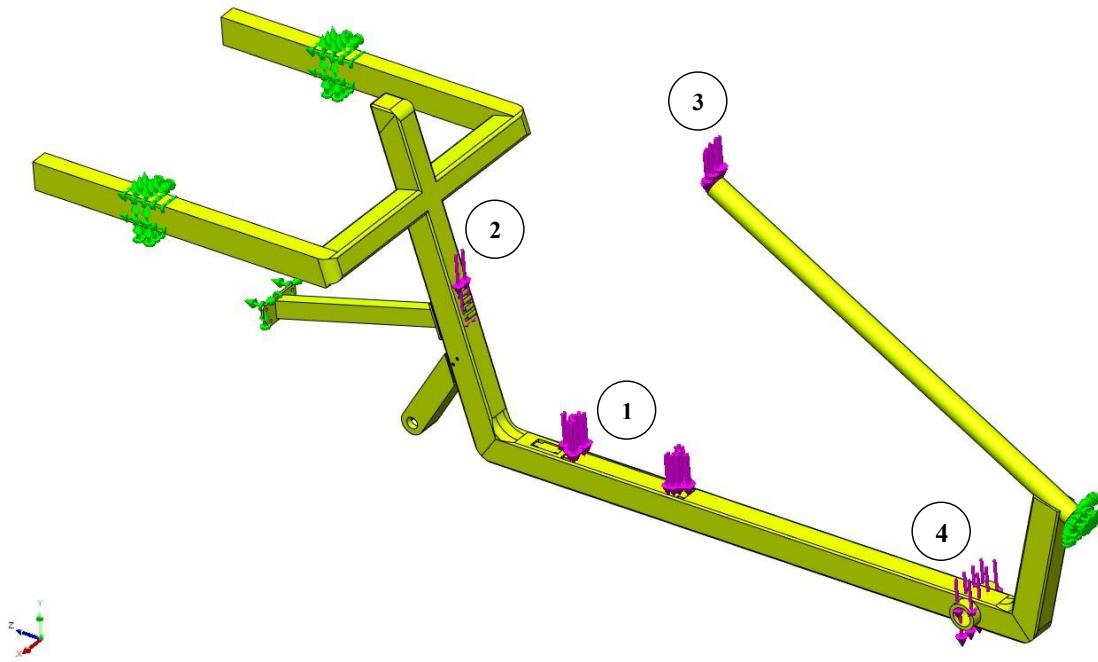


Fig. 47: Lugar de aplicación de las cargas

Utilizando el material compuesto sintetizado de Poliéster Reforzado de Fibra de Vidrio y ejecutando una simulación de análisis estático sobre el objetivo de investigación, el marco del vehículo, se ha recopilado la siguiente información.

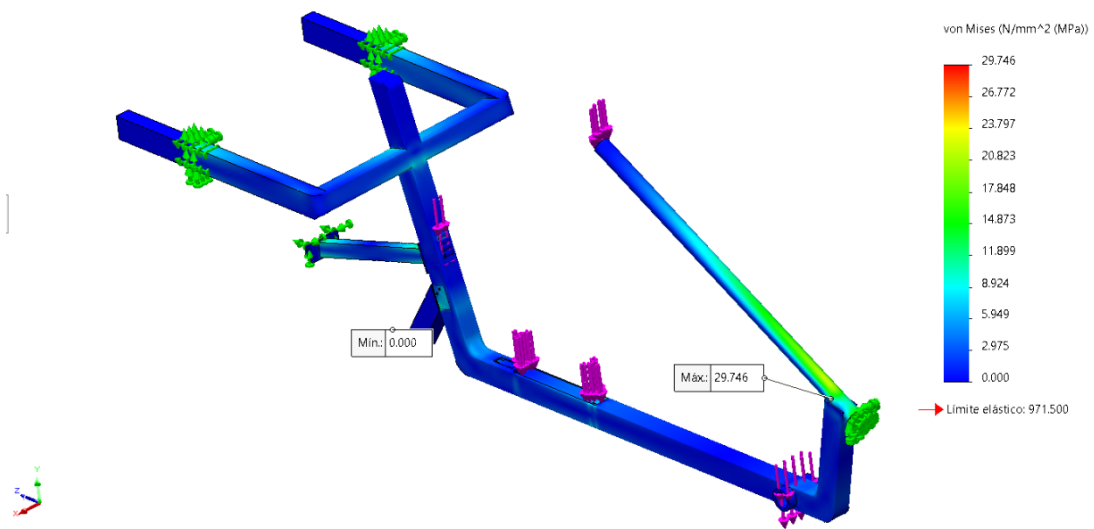


Fig. 48: Representación y gráfica de esfuerzos con material PRFV

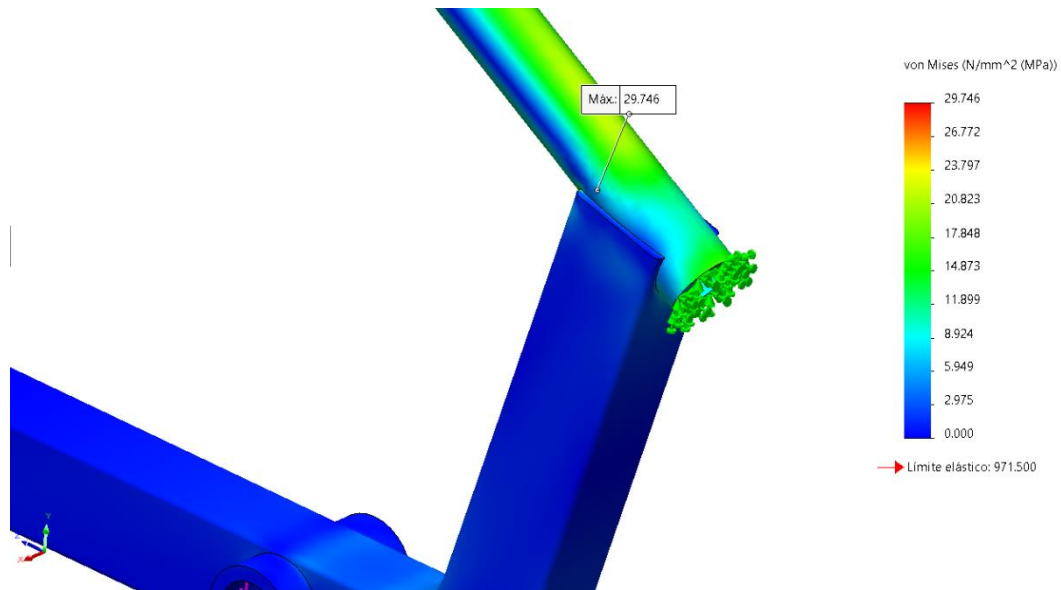


Fig. 49: Esfuerzos sobre el miembro estructural – tubo guía del timón y horquilla

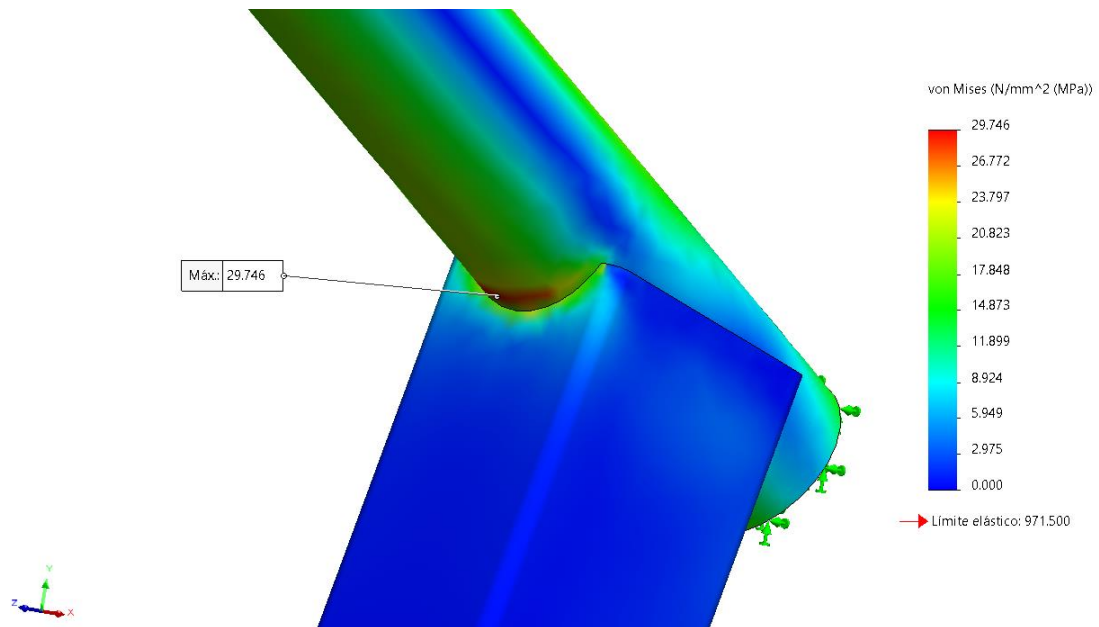


Fig. 50: Punto en donde se ha aplicado el máximo esfuerzo

Se aprecia (Fig. 48, Fig. 49 y Fig. 50), de acuerdo al punto indicado y a la gráfica rgb, el esfuerzo máximo generado sobre el marco con material compuesto PRFV con un valor de 29,746 MPa, con un límite elástico del material de 971,500 MPa; en la unión que conecta el tubo guía del timón y la horquilla de la llanta delantera, debido a la geometría de la pieza y la posición en la cual se encuentra.

Las cargas generan un desplazamiento, y de acuerdo al software CAD, este puede percibirse exagerado, al contrario de la realidad; además influye la capacidad elástica del material aplicado.

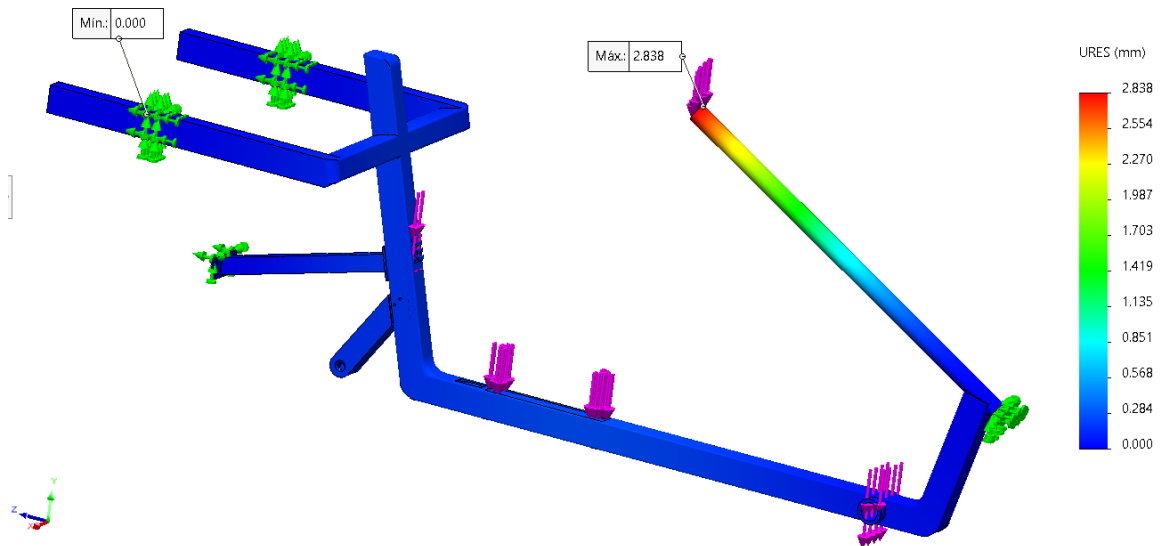


Fig. 51: Desplazamiento en milímetros de la estructura con PRFV

El desplazamiento máximo obtenido es de 2,838 mm en la parte superior delantera, guía que une a los componentes de manubrio y horquilla del sistema.

Favorablemente, debido a las propiedades del material compuesto de poliéster y fibra de vidrio tipo S, los esfuerzos máximos no superan el límite y por tanto el factor de seguridad resultante es 32,66.

El valor obtenido es debido a un sobredimensionamiento de los perfiles en las configuraciones: rectangular hueco con espesores de $10 \times 12,5$ mm y $8,75 \times 12,5$ mm; y circular hueco de 4 mm, con influencia de la fabricación por capas de ambos materiales para obtener la matriz deseada y su naturaleza.

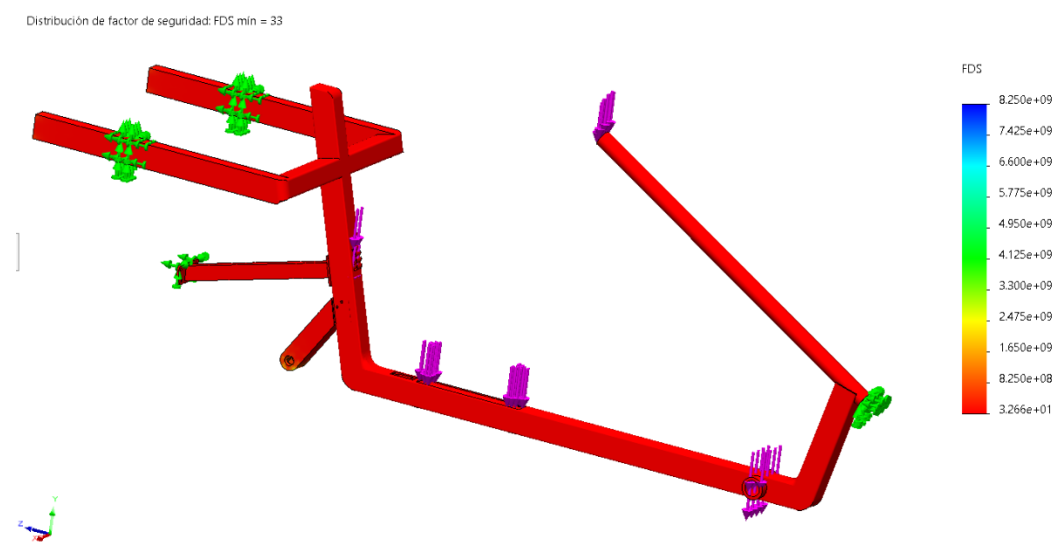


Fig. 52: Grafica y representación del factor de seguridad aplicado al ensamblaje.

Asimismo, la masa calculada por la herramienta de “Propiedades físicas” del programa afirma 12,1246 kg con el material objetivo, considerando a toda la estructura presente del mismo material.

Comparación con materiales actuales

En la industria de este tipo de vehículos se encuentran diferentes configuraciones de materiales, tanto para la estructura, como para las piezas y componentes a usar. Es por ello, que se han seleccionado cuatro (4) materiales utilizados en los marcos de los triciclos para realizar una comparativa bajo el mismo estudio estático.

Se ha seleccionado, en orden respecto a la densidad (menor a mayor) los siguientes materiales, extraídos de la librería de CES EduPack:

- **Fibra de carbono**
 - Cuasi – isotrópica laminada con configuración 0, +45, -45, 90.

Tabla 21: Propiedades mecánicas de la Fibra de carbono [47]

PARÁMETROS	MIN	MAX	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS			
Densidad	1,55e3	1,57e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Módulo de Young	56,1	57,1	GPa
Límite elástico	460	473	MPa
Módulo de flexión	104	106	GPa
Módulo de ruptura	460	473	MPa
Ratio de Poisson		0,31	
PRECIO			
Precio	344	391	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA			
Energía incorporada	709	781	MJ/kg
Huella de carbono	48,9	53,9	kg/kg

La fibra de carbono es un material de baja densidad con una alta relación respecto al módulo elástico. Sin embargo, esta debe combinarse con otro material para desarrollar una matriz para generar una mayor rigidez en la estructura. Es también resistente a muchos factores como la corrosión, humedad y factores ambientales (polvo, agua y viento); aunque una gran desventaja es el debilitamiento estructural correspondiente al mecanizado y unión de piezas y componentes, es decir es un material no soldable, la unión de capas se da mediante adhesivos de grado industrial como el cianocrilato.

Se visualiza que el esfuerzo máximo respecto a este material, es de 30,788 MPa, con un límite elástico de 466,455 MPa.

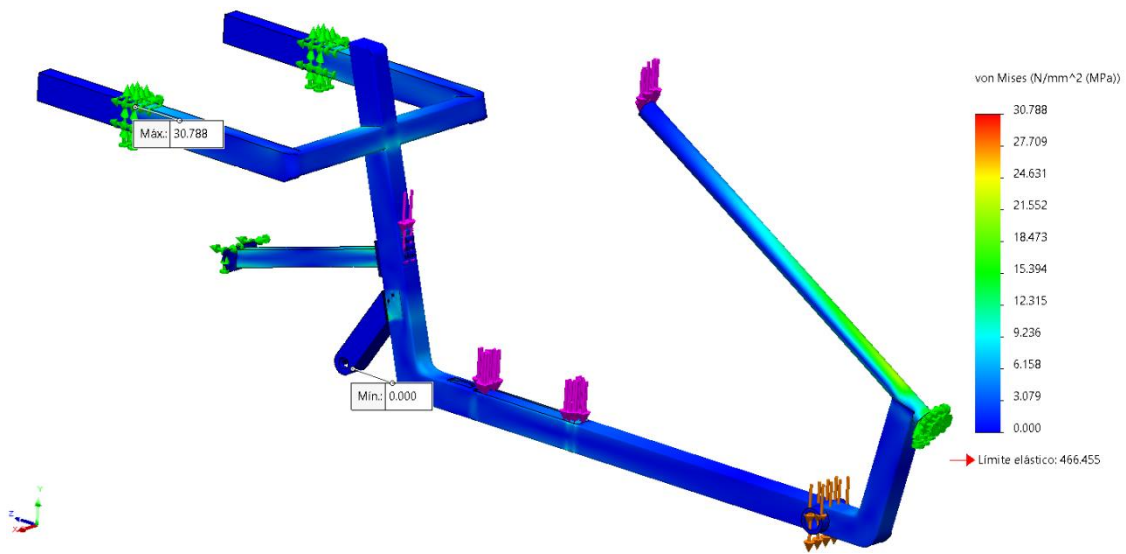


Fig. 53: Representación y gráfica de esfuerzos con material de Fibra de carbono

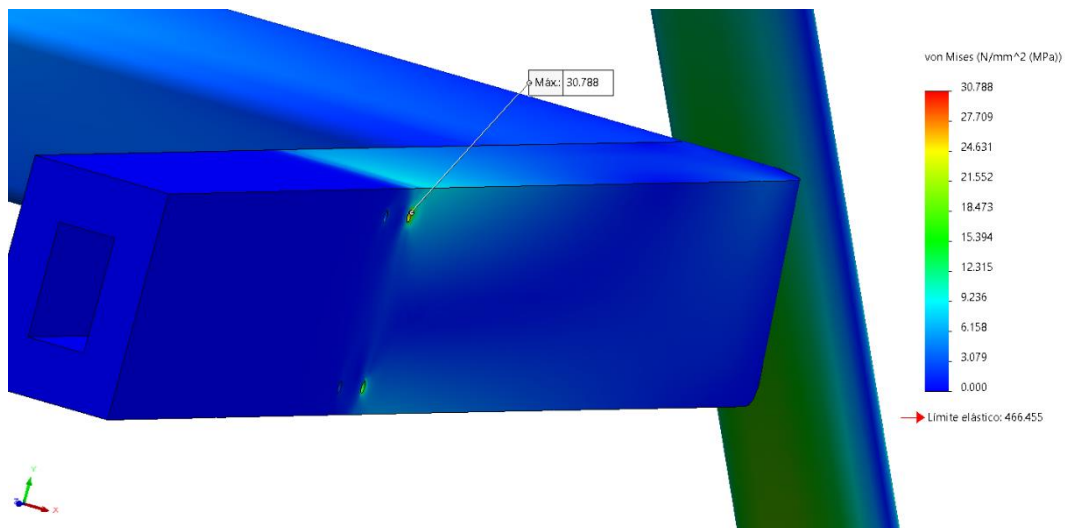


Fig. 54: Esfuerzos sobre el miembro estructural – soporte donde se ubicarán los amortiguadores de Fibra de carbono

Es, por tanto, que al ser un material ligero y flexible conlleva a desplazamientos más grandes respecto al material objetivo; una medida de aproximadamente 4,050 mm, debido a los vectores de carga sobre la estructura.

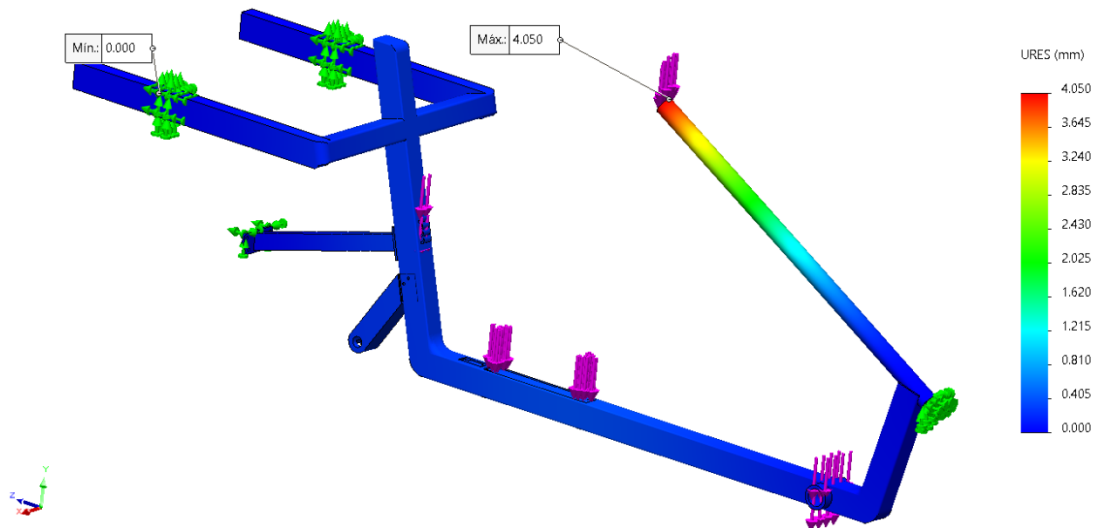


Fig. 55: Desplazamientos de la estructura con material de Fibra de Carbono

El material al ser tratado únicamente como una fibra laminada con una configuración de 45° en alternancia presenta un alto factor de seguridad en relación a la geometría y perfil y flexibilidad, por lo cual se recomienda un material intermedio el desarrollo de la matriz para producir rigidez estructural. Este valor es aproximado a 15,15.

Distribución de factor de seguridad: FDS min = 15

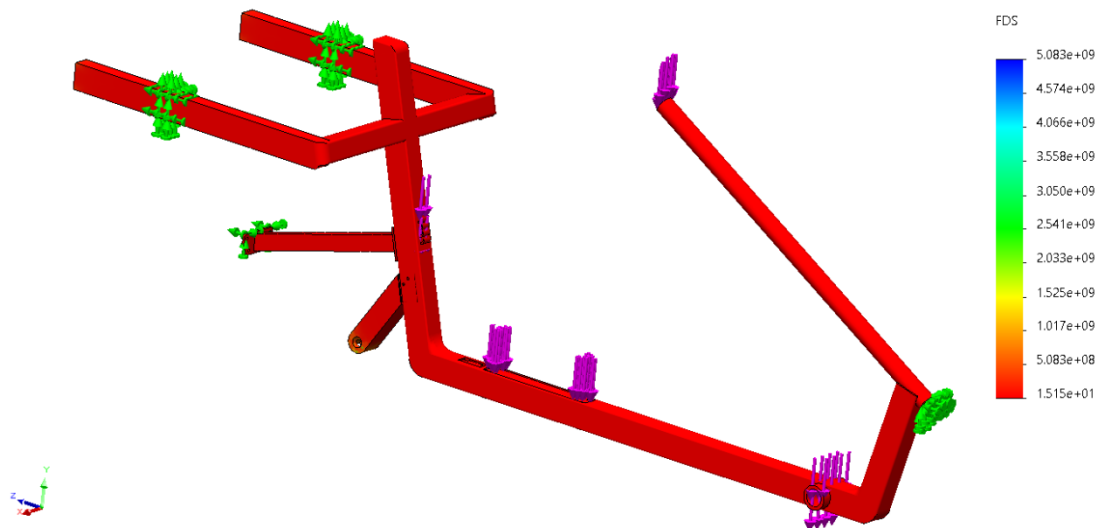


Fig. 56: Factor de seguridad del marco con Fibra de carbono laminada 45°

La masa obtenida con la fibra de carbono es de 8,00059 kg, siendo el material menos denso, pero más flexible que el resto en comparación.

- **Aluminio 6061 T6**

- Aluminio de la serie 6000, con contenido de Magnesio y Silicio.
- Cuenta con un tratamiento térmico y artificialmente envejecido T6.

Tabla 22: Propiedades mecánicas del Aluminio 6061 T6 [47]

PARÁMETROS	MIN	MAX	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS			
Densidad	2,69e3	2,73e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Módulo de Young	66,6	70	GPa
Límite elástico	240	280	MPa
Módulo de flexión	66,6	71,3	GPa
Módulo de ruptura	240	280	MPa
Ratio de Poisson	0,325	0,335	
PRECIO			
Precio	7,26	8,43	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA			
Energía incorporada	190	210	MJ/kg
Huella de carbono	12,6	13,9	kg/kg
Consumo de agua	1,13e3	1,25e3	l/kg

El aluminio 6061 T6 es muy utilizado en vehículos con inclusión de potencia humana como alas delta y marcos de bicicleta por la ligereza y resistencia, contextos relacionados a una geometría y perfil circular o elíptico, además de permitir el uso y aplicación de soldadura; asimismo, presenta una excelente resistencia a la corrosión y una gran capacidad de extrusión y maquinabilidad.

No obstante, para la geometría y perfil de la estructura diseñada no ha sido un material óptimo debido a los esfuerzos presentes. Es decir, deben acoplarse los sistemas de amortiguación para desarrollar una estructura más flexible y evitar daños futuros o situaciones de pandeo.

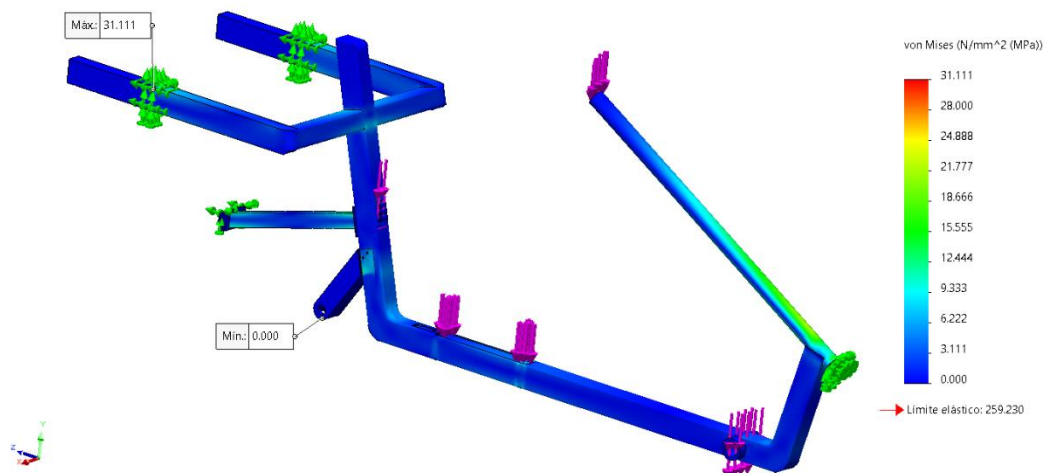


Fig. 57: Esfuerzo desarrollado sobre la estructura con Aluminio 6061 T6

Apreciando en la figura 57, el esfuerzo máximo 31,111 MPa con un límite elástico de 259,230 MPa.

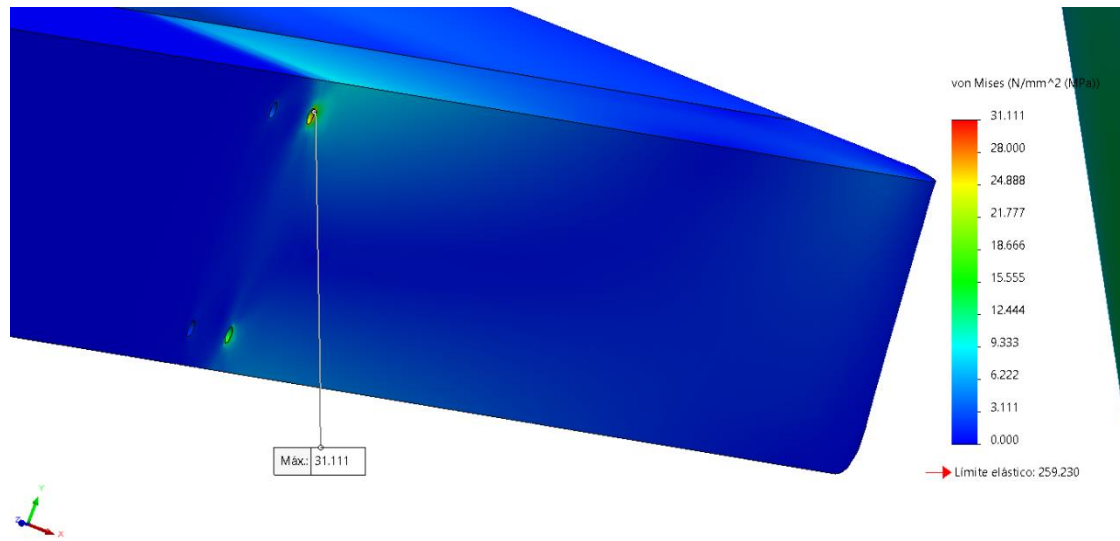


Fig. 58: Esfuerzos sobre el miembro estructural con Aluminio 6061 T6

Respectivamente, la estructura efectúa un desplazamiento en la simulación de estudio estático a pesar de la rigidez real del material; debido al flujo vectorial de cargas hacia esa posición de la pieza. El valor resultante es de 3,356 mm en la parte superior delantera del sistema.

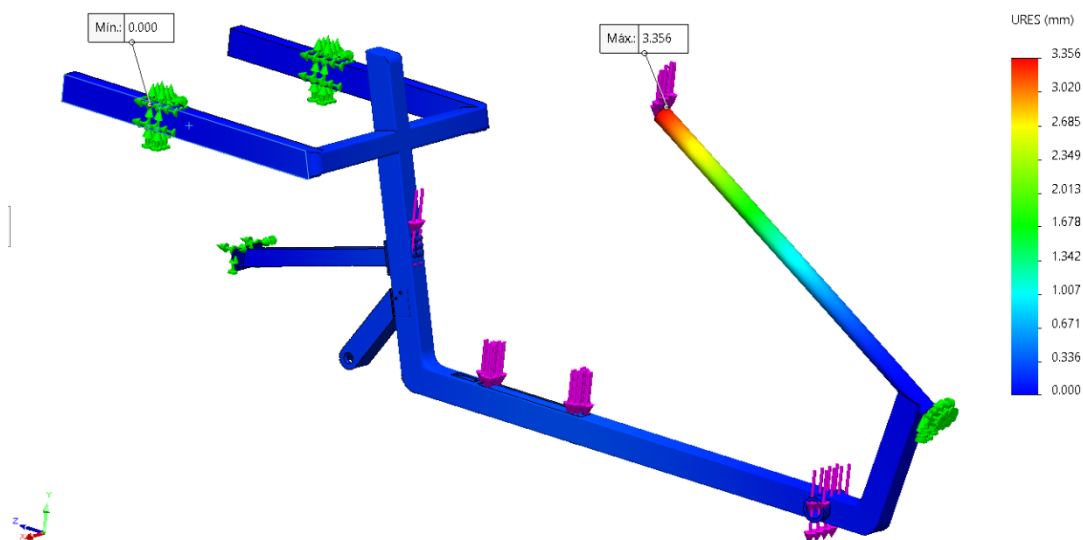


Fig. 59: Desplazamiento de la estructura con material Aluminio 6061 T6

Y, de forma consecutiva, se detalló el factor de seguridad presente para esta geometría de marco para un vehículo de potencia humana, con un valor de 8,3.

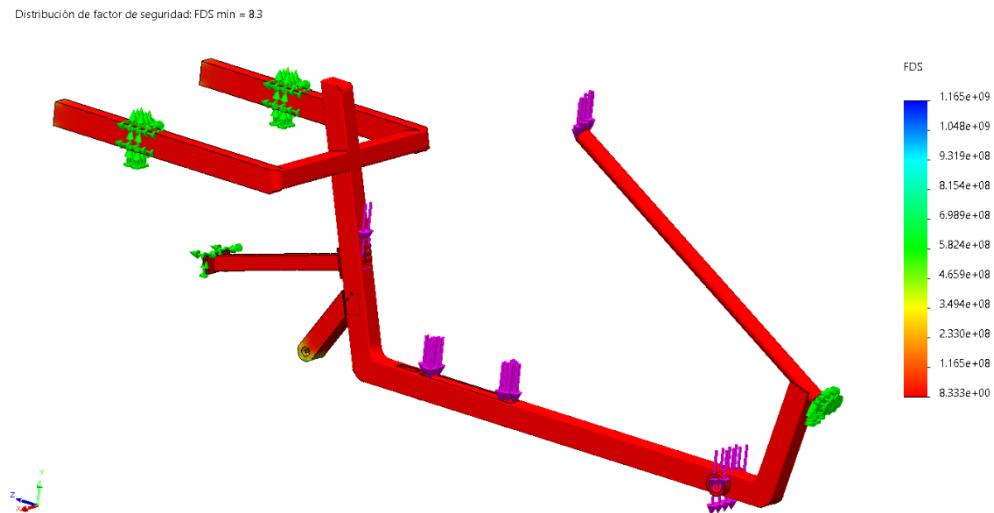


Fig. 60: Factor de seguridad del marco con Aluminio 6061 T6

Considerando una masa ligera con este aluminio de 13,929 kg.

- **Aluminio 7075 T6**
 - Aluminio de la serie 7000 con contenido de Zinc.
 - Tratado térmicamente y un proceso de envejecimiento artificial T6.

Tabla 23: Propiedades mecánicas del Aluminio 7075 T6 [47]

PARÁMETROS	MIN	MAX	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS			
Densidad	2,77e3	2,83e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Módulo de Young	69	76	GPa
Límite elástico	359	530	MPa
Módulo de flexión	69	76	GPa
Módulo de ruptura	359	530	MPa
Ratio de Poisson	0,325	0,335	
PRECIO			
Precio	14,4	17	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA			
Energía incorporada	184	203	MJ/kg
Huella de carbono	12,5	13,8	kg/kg
Consumo de agua	1,08e3	1,19e3	l/kg

Este material es comercialmente conocido como Zicral [48] , y es utilizado en múltiples aplicaciones industriales; pues presenta alta resistencia a la fatiga, facilidad de mecanizado y alta durabilidad. Aunque, la serie presente del material implica una mayor protección en ambientes húmedos, debido al limitado potencial anticorrosivo.

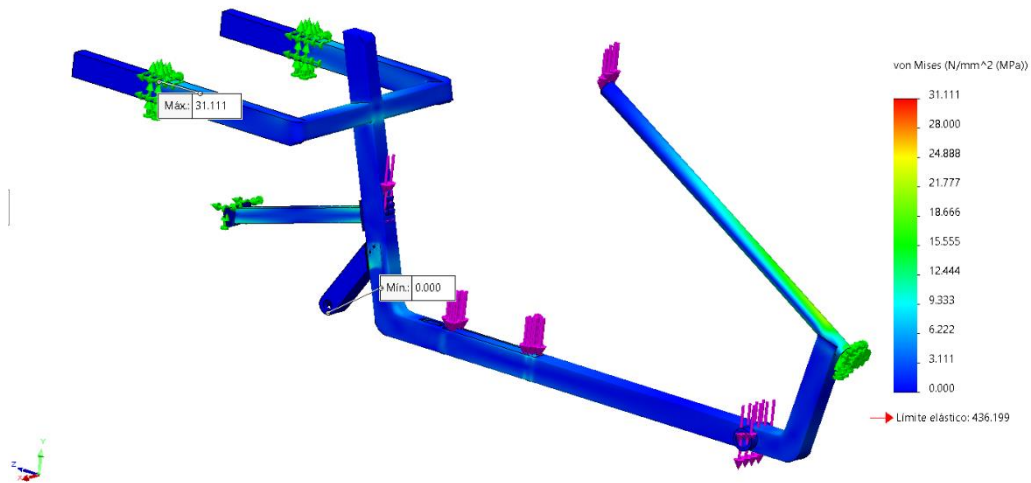


Fig. 61: Esfuerzos aplicados sobre la estructura con Aluminio 7075 T6

El punto de máximo esfuerzo, 31,111 MPa, con límite elástico de 436,199 MPa; se encuentra en el mismo punto que los materiales anteriores, en agujero donde se ubicarían los pasadores o soportes de los amortiguadores. Siendo este componente el que va a recibir todo tipo de impacto inicialmente cuando exista una carga vertical hacia abajo.

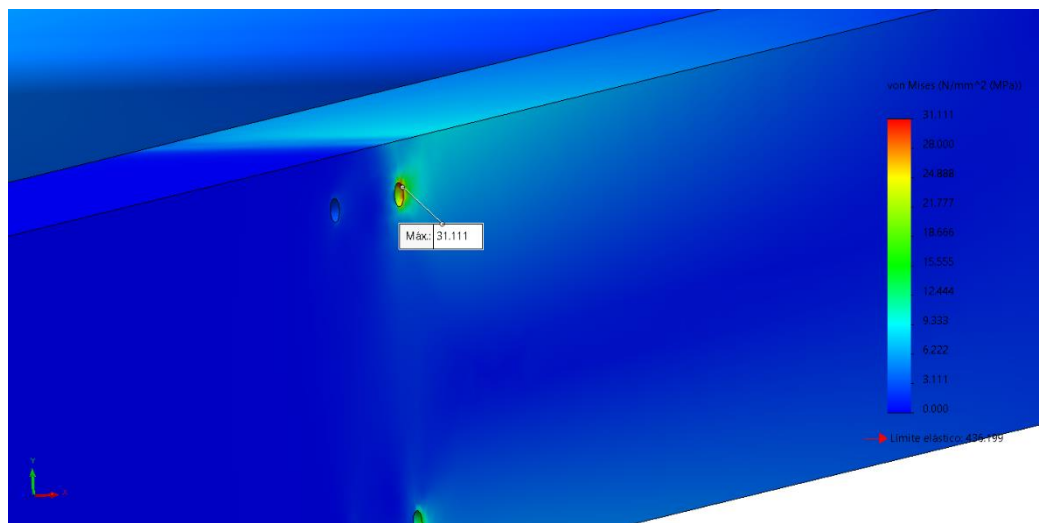


Fig. 62: Esfuerzos sobre el miembro estructural con Aluminio 7075 T6

Este tipo de aluminio se desplaza una distancia de 3,164 mm, es decir que el material puede estirarse o desplazarse debido a la flexión.

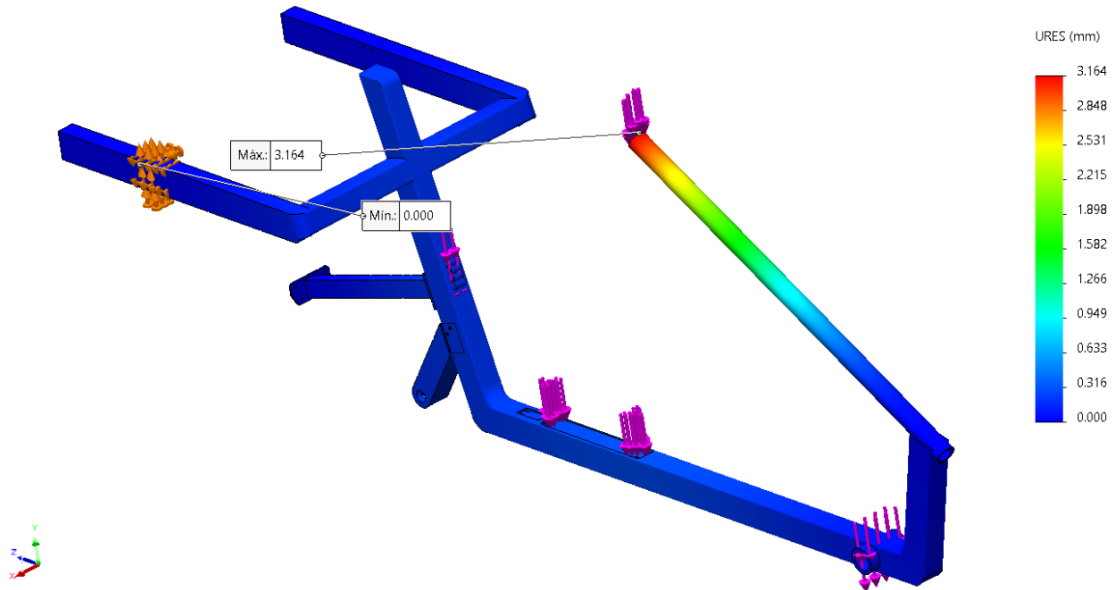


Fig. 63: Desplazamiento de la estructura con material Aluminio 7075 T6

Este aluminio 7075 T6 presenta un mejor comportamiento que el aluminio 6061 T6 respecto a los límites elásticos, aumentando en cinco unidades con siete decimales (+5,7) en el factor de seguridad, es decir un factor de seguridad 14.

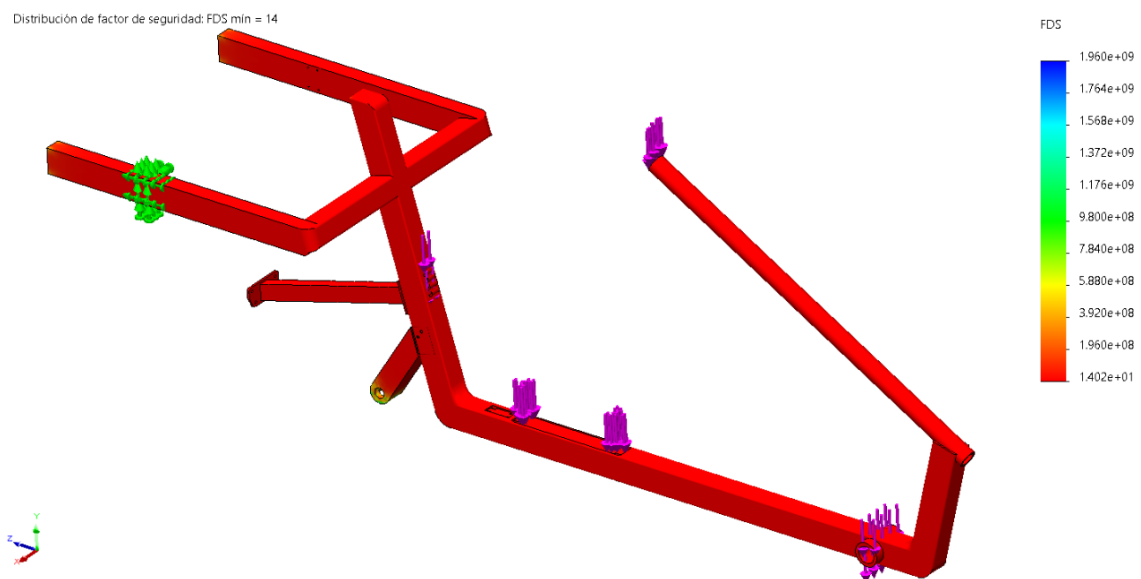


Fig. 64: Factor de seguridad del marco con Aluminio 7075 T6

El aluminio 7075 T6 es más denso que el aluminio 6061 T6, por tanto, su masa es de 14,376 kg.

- **Acero Cromoly**

- Acero AISI 4130, de baja aleación y de uso general.
- Usado en aplicaciones de gran temple y resistencia a la tracción.

Tabla 24: Propiedades mecánicas del Acero AISI 4130 [47]

PARÁMETROS	MIN	MAX	UNIDAD
PROPIEDADES FÍSICAS			
Densidad	7,81e3	7,84e3	kg/m ³
PROPIEDADES MECÁNICAS			
Módulo de Young	197	205	GPa
Límite elástico	359	530	MPa
Módulo de flexión	69	76	GPa
Módulo de ruptura	359	530	MPa
Ratio de Poisson	0,325	0,335	
PRECIO			
Precio	3,01	3,11	PEN/kg
ENERGÍA PARA PRODUCCION, CO2 Y AGUA			
Energía incorporada	184	203	MJ/kg
Huella de carbono	12,5	13,8	kg/kg
Consumo de agua	1,08e3	1,19e3	l/kg

El acero Cromoly, es un acero con aleación de Cromo y Molibdeno, y como tal, tiene una mayor vida útil y gran resistencia a la fatiga. Además, como característica del acero es la resistencia a la tracción y ductilidad, así como la absorción natural de vibraciones transmitidas por el terreno. Otra ventaja presente en el material es la facilidad de mecanizado sin perder propiedades y de soldadura [49]. Sin embargo, es pesado, lo cual conlleva a una carga más.

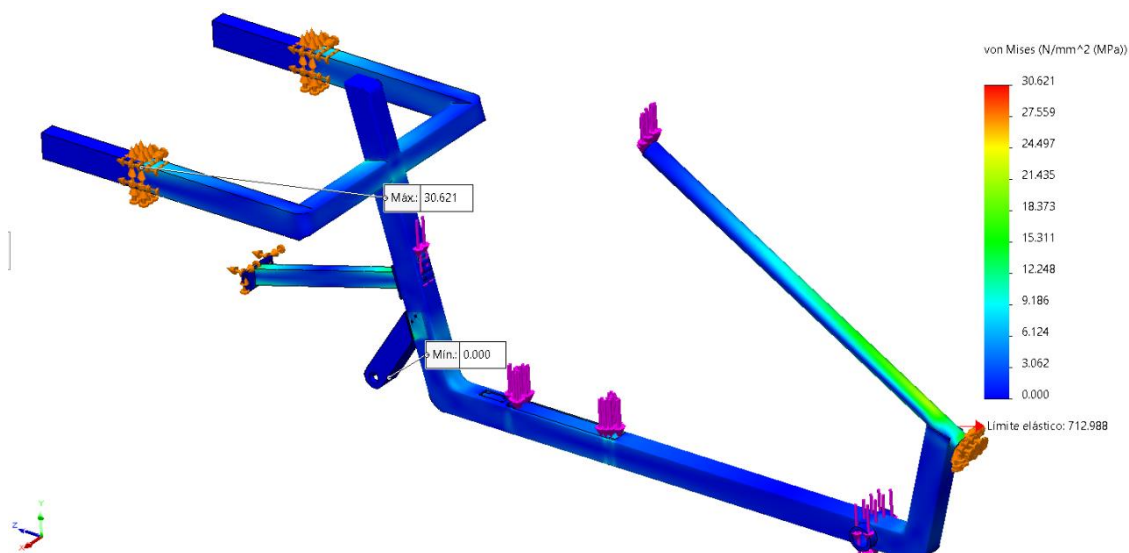


Fig. 65: Esfuerzos desarrollados con material Acero Cromoly

El esfuerzo máximo generado sobre la estructura de acero Cromoly es de 30,621 MPa sobre un límite elástico de 712,988 MPa, es decir, es un material óptimo para el desarrollo del vehículo de potencia humana.

Y siendo el punto de soporte donde se ubicarán los amortiguadores del vehículo de potencia humana en donde se recibe la mayor carga de esfuerzos debido a la reacción referida por el sistema de apoyo y sujeción.

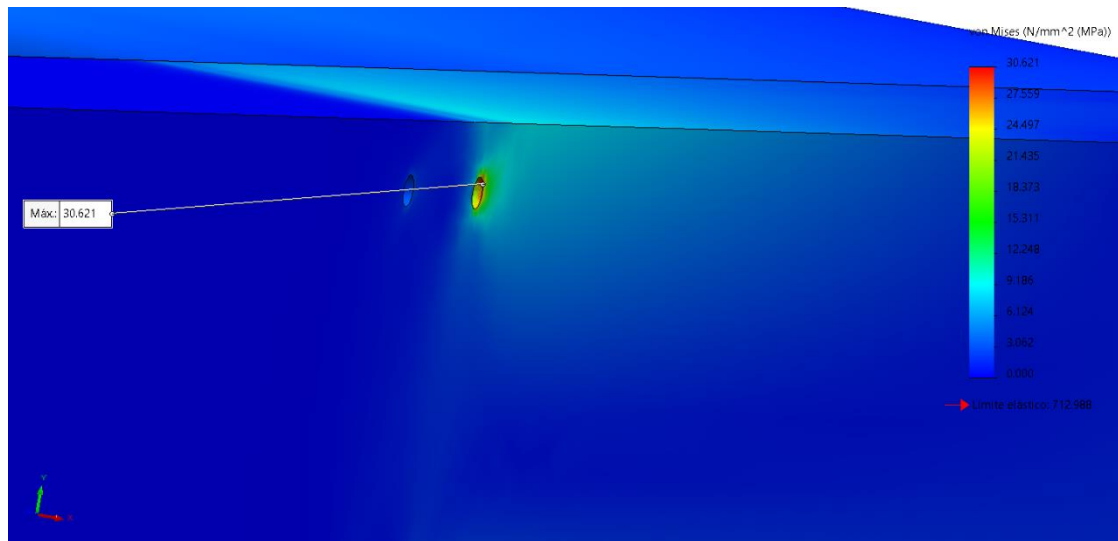


Fig. 66: Esfuerzos sobre el miembro estructural con Acero Cromoly

Al ser un material más rígido que los anteriores presentados, el desplazamiento y flexibilidad es más corto, 1,141 mm, como se muestra en la figura 67.

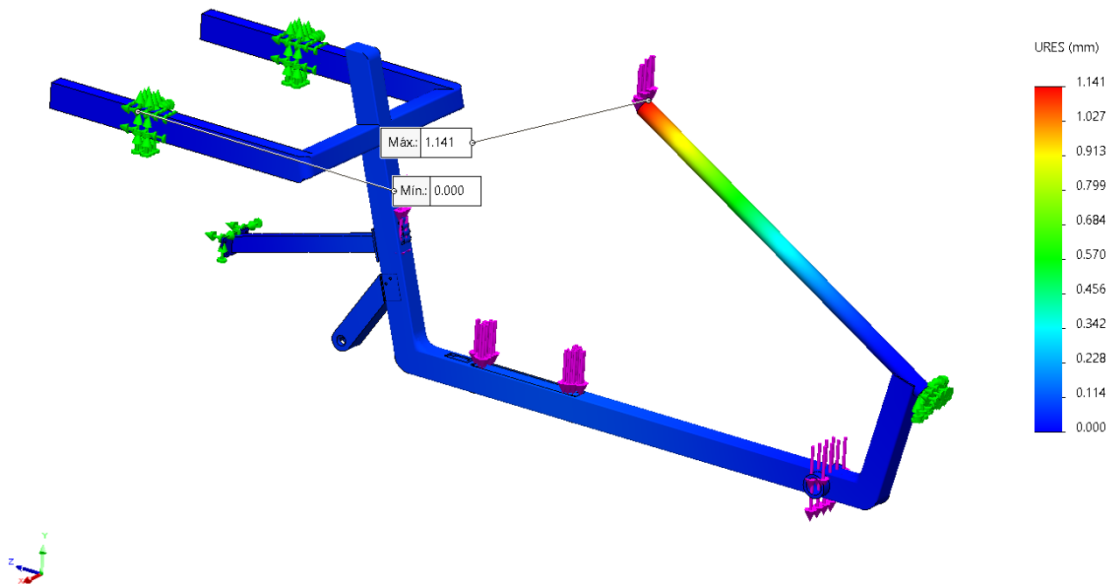


Fig. 67: Desplazamientos de la estructura con material de Acero Cromoly

La estructura de acero, si bien posee una alta densidad respecto a las otras, mostró un factor de seguridad en sobredimensionamiento, debido al grosor del perfil y la geometría del marco del vehículo. El valor resultante es de 23.

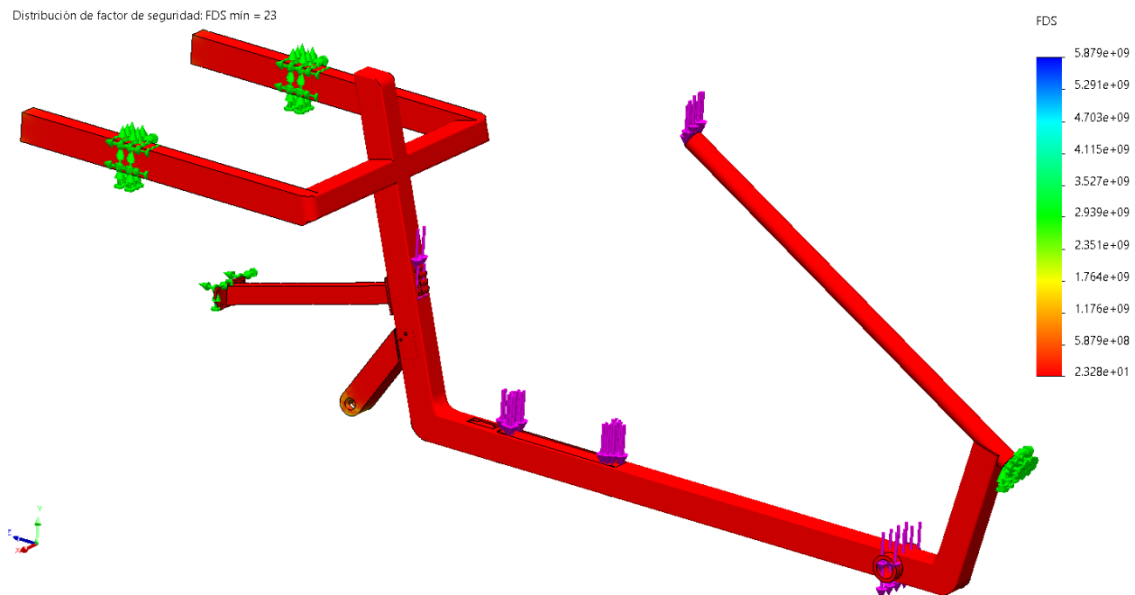


Fig. 68: Factor de seguridad del marco con Acero Cromoly

El acero es el material más denso entre los escogidos para la comparación, por tanto, se hace un marco pesado para el usuario común, y una mayor carga de esfuerzo. Este valor de masa es 40,177 kg.

Incidencia de la reducción de masa sobre la resistencia estructural del marco del vehículo.

La resistencia estructural de un cuerpo se encuentra estrechamente relacionado a su densidad, por lo tanto, al ser mayor su masa mayor será su resistencia. Sin embargo, bajo el concepto de este proyecto, el material sintetizado es de baja densidad respecto a los metales considerados en la aplicación; la geometría y perfil diseñados logran soportar los esfuerzos aplicados, garantizado que la estructura o marco del vehículo cumpla con la reducción de masa respecto de los materiales utilizados actualmente sin afectar a su integridad.

Para alcanzar un rendimiento eficiente y seguro del marco del vehículo es necesario encontrar el equilibrio entre la seguridad y rendimiento entregados por los materiales seleccionados; por separado, la resina poliéster brinda ligereza, resistencia térmica, resistencia a la humedad y a algunos químicos; y la fibra de vidrio tipo S, demuestra una alta resistencia a la fatiga y alto módulo de rigidez. Unidos, mediante una matriz isotrópica, las propiedades químicas y mecánicas se unen, conformando una matriz ligera, de baja densidad, y notable módulo de Young y límite elástico.

El material de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) presenta una densidad mayor que la fibra de carbono, aunque menor que los metales (*Gráfico 1*); es también, a

favor del material sintetizado, que el material compuesto reduce la masa total del vehículo y en comparación con modelos y materiales existentes, es un diseño liviano (*Gráfico 2*). Asimismo, de manera subjetiva esto facilita la comodidad y disminuye la fatiga al usuario para movilizar el sistema.

Gráfico 1: Comparativa de densidades de los materiales considerados.

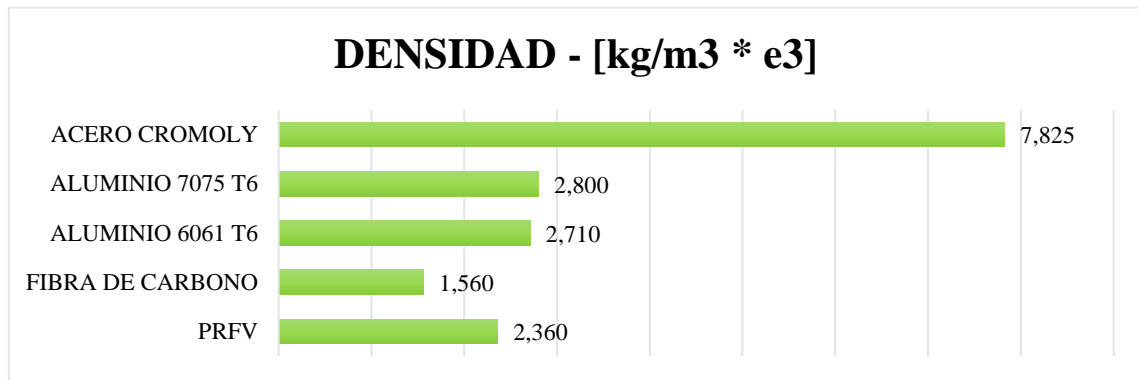
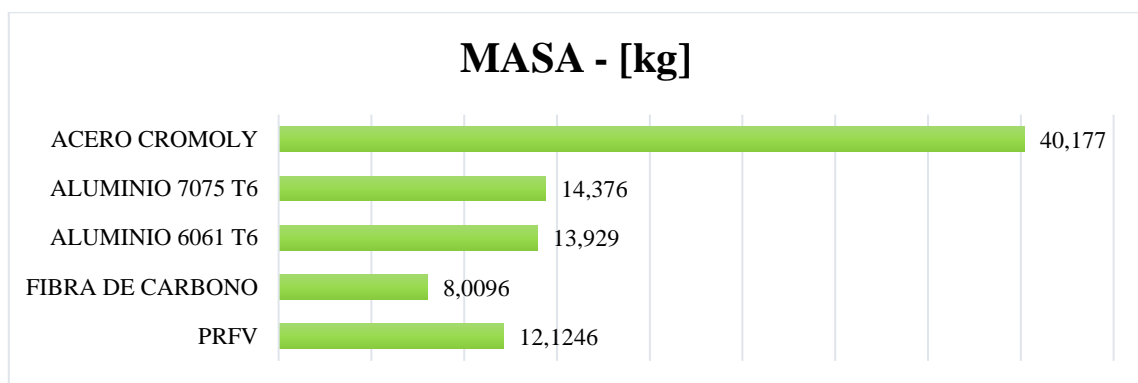


Gráfico 2: Comparativa de masas en el cuadro del vehículo.



De acuerdo al valor obtenido con respecto a los límites elásticos y esfuerzos máximos, el factor de seguridad alcanzado es mayor que todos los materiales seleccionados en la aplicación pertinente (*Ver gráficos 3, 4 y 5*)

Gráfico 3: Comparativa des límite elástico de los materiales considerados.

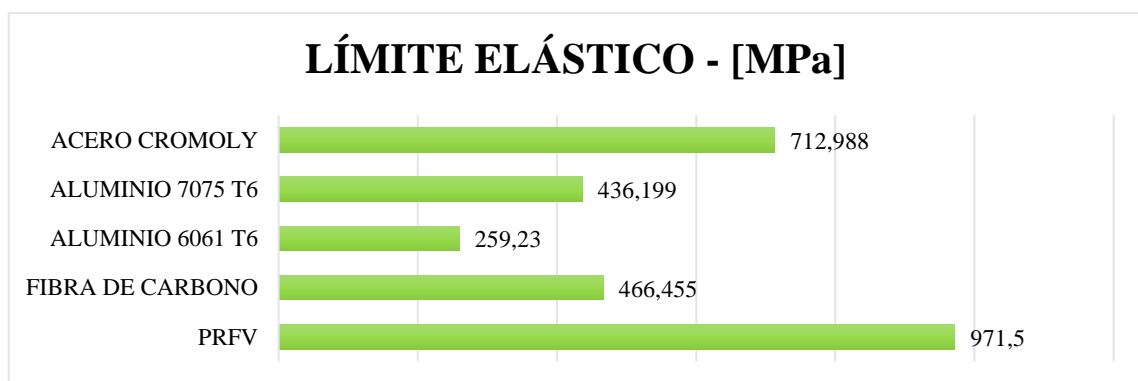
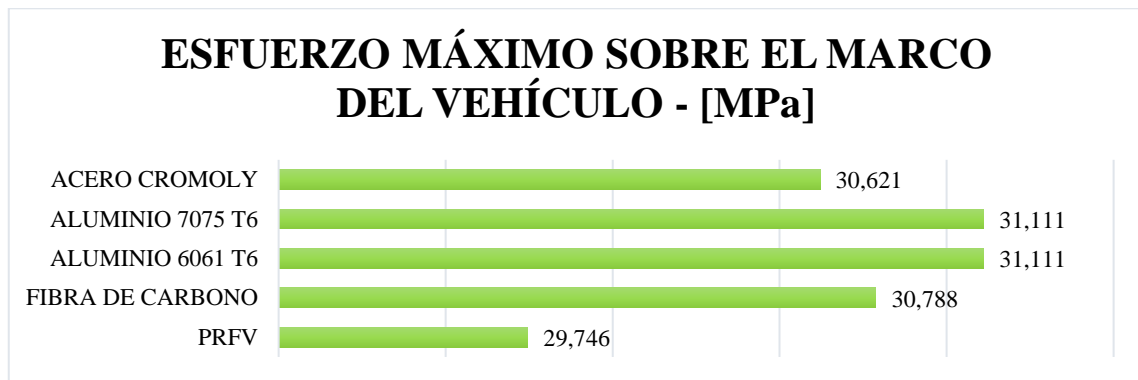
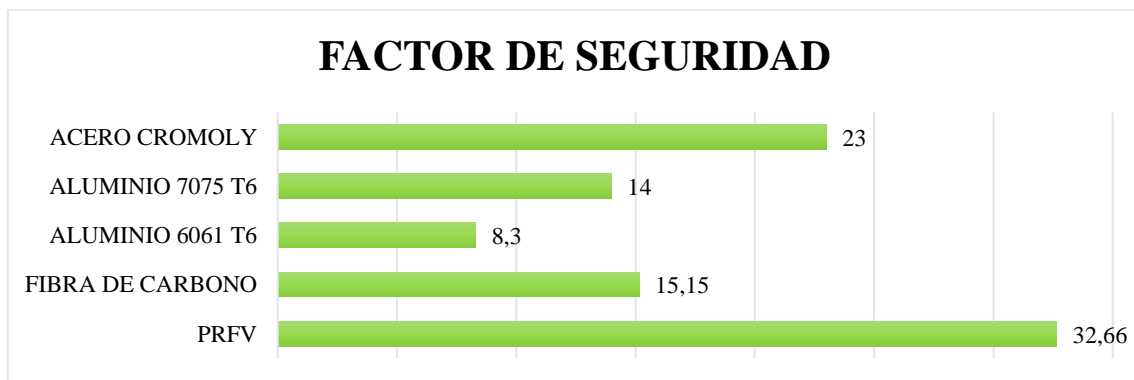


Gráfico 4: Comparativa de esfuerzos en el cuadro del vehículo.



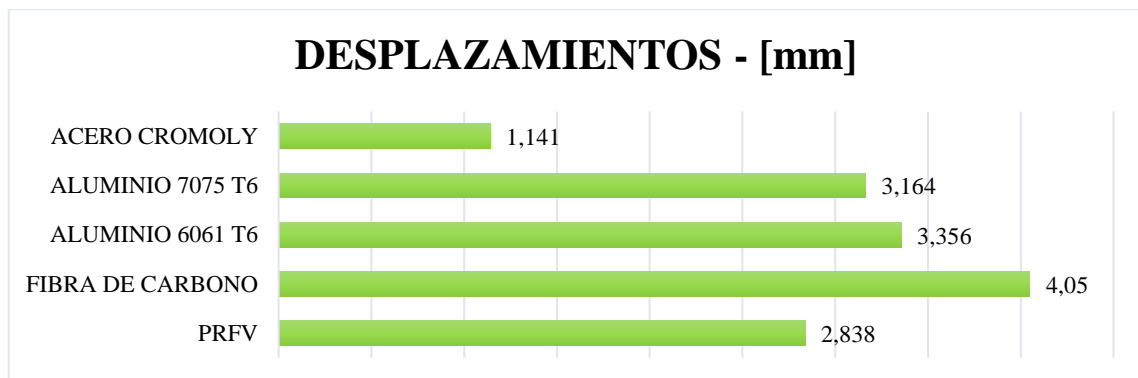
El factor de seguridad obtenido en todos los materiales analizados ha sido de valor alto, indicando un margen de seguridad imponente; a favor de la estructura estos valores indican garantía de resistencia en el diseño. Sin embargo, es notable el sobredimensionamiento al conocer este número acorde a las cargas aplicadas sobre el chasis, presentando un marco robusto.

Gráfico 5: Comparativa de factores de seguridad en el cuadro del vehículo.



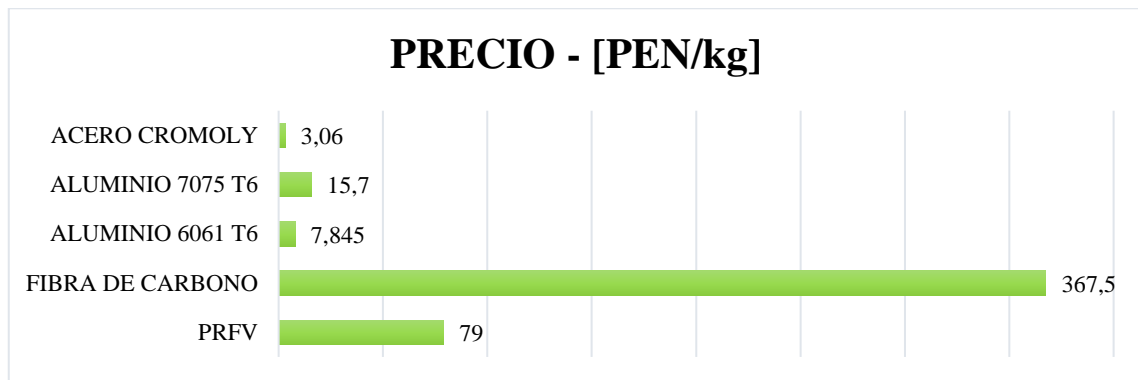
El desplazamiento sobre la estructura es debido a la forma del marco y flexibilidad de los materiales, considerando la propiedad de límite elástico y módulo de Young.

Gráfico 6: Comparativa de desplazamientos en el cuadro del vehículo.



Asimismo, el precio del material por kilogramo es, ciertamente, elevado en comparación a los metales optados, sin embargo, es aproximadamente una cuarta parte del costo de la fibra de carbono.

Gráfico 7: Comparativa de precio de los materiales considerados.



Por tanto, el material escogido y desarrollado para la aplicación del marco de un vehículo de potencia humana es referente de uso, considerando las ventajas de sus propiedades físicas, mecánicas y costo.

Tabla 25: Resumen de materiales y sus resultados

MATERIAL	POLIESTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO TIPO S	FIBRA DE CARBONO	ALUMINIO 6061 T6	ALUMINIO 7075 T6	ACERO CROMOLY	PARÁMETROS
						Unidad
DENSIDAD	kg/m ³	2,36e3	1,55e3 - 1,57e3	2,69e3 - 2,73e3	2,77e3 - 2,83e3	7,81e3 - 7,84e3
LÍMITE ELÁSTICO	MPa	971,500	466,455	259,230	436,199	712,988
MASA	kg	12,1246	8,0096	13,929	14,376	40,177
ESFUERZO MÁXIMO SOBRE EL MARCO DEL VEHÍCULO	MPa	29,746	30,788	31,111	31,111	30,621
DESPLAZAMIENTOS	mm	2,838	4,050	3,356	3,164	1,141
FACTOR DE SEGURIDAD	Adim.	32,66	15,15	8,3	14	23
PRECIO	PEN/kg	79	344 – 391	7,26 – 8,43	14,4 – 17	3,01 – 3,11

La tabla 25 presenta un resumen de los valores obtenidos por comparación de los materiales usados en la fabricación de marcos de vehículos de potencia humana, colocando en el orden descrito en el apartado anterior, el material objetivo primero, seguido en orden ascendente respecto al valor de la densidad los demás materiales.

V. CONCLUSIONES

1. El diseño del vehículo de potencia humana se basó en modelos existentes considerando la necesidad de seguridad, estabilidad, masa ligera y resistencia al polvo y humedad; del usuario no profesional. Contemplando y respetando los modelos destacados del concepto modelo delta, se resaltan funciones y características inspirativas, como la ubicación de transmisión de potencia, dirección de giro, posición de altura de manubrio y la posición semi – Fowler; estas últimas considerando que la ergonomía influye en la capacidad para ejercer la potencia deseada sin generar grandes esfuerzos a la persona; además, la estructura se compone por varias piezas para evitar debilitamientos por maquinados o uniones.
2. El modelo conceptual del vehículo de potencia humana se sustentó en la configuración “Recumbet (o reclinado)”;
- acorde al estudio ergonómico, se considera el ángulo de inclinación entre asiento (línea horizontal) y respaldar en 105° , como ángulo base del sistema. Asimismo, las dimensiones de la estructura se basan en la antropometría masculina obtenidas mediante la interpolación polinomial, seleccionando como estatura promedio 1,70 m.
3. El diseño se plasmó, en el software SOLIDWORKS, empleando la ubicación de los puntos de interés antropométricos. El modelado CAD 3D, se planteó acorde a las líneas guía y acotaciones, en referencia a los perfiles rectangulares huecos $[50 \times 40 - 25 \times 20]$ y $[50 \times 30 - 25 \times 12,5]$ (medidas en mm) y el tubo guía de la horquilla de perfil estándar de 33,7 mm de diámetro y 4 mm de espesor. También, en consideración se da el ángulo del respaldar, el cual puede ser variable de gradación de reclinación del piloto para su comodidad y un asiento deslizante para estaturas variables. Además, el sistema comprende piezas desmontables que permiten las sujeciones y desmontajes de subsistemas como el canal deslizante del asiento, la articulación del respaldo, el sistema de amortiguación, rótula y diferencial mediante transmisión de cadena – piñón.
4. Es concluyente, que, habiendo definido y aplicado las cargas de 73,5; 31,605; 9,555 y 27,195 kg que afectan al sistema; el material seleccionado como objetivo

de la investigación, Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio tipo S, presenta propiedades mecánicas óptimas para el desarrollo de un vehículo de potencia humana, apreciando que, la configuración sintetizada de la matriz isotrópica lineal registrada, indica un límite elástico de 971,500 MPa. El esfuerzo máximo generado sobre el marco es de 29,746 MPa; presentando un factor de seguridad de 32,66; además de ser ligero debido al uso de fibras, con densidad de $2,36 \times 10^3$ kg/m³, por lo tanto, una masa de 12,125 kg. En comparación a los otros materiales, es más denso que la fibra de carbono la cual es más ligera debido a su naturaleza; aunque al lado de los metales es liviano y flexible para soportar cargas superiores a las analizadas.

VI. RECOMENDACIONES

- La posición semi Fowler en el estilo reclinado de vehículos de potencia humana presenta una relación entre potencia y velocidad, debido al descanso lumbar, se sugiere continuar con el análisis del ángulo de inclinación del respaldo del asiento para una mayor generación de potencia y a una velocidad constante, respecto al tiempo de ciclismo.
- El tallaje es una variable de fuerte impacto en el dimensionamiento de la estructura del marco, considerar que la información corresponde a la antropometría de la población dirigida, se recomienda investigar métodos algorítmicos para desarrollar un marco personalizado según la antropometría del sujeto en específico.
- El perfil de la estructura del marco presenta un espesor grueso por la configuración de capas de materiales, por tanto, a las siguientes investigaciones se recomienda realizar ensayos y análisis con diferentes disposiciones de ordenamiento de número de capas y espesores, de fibra y matriz con los mismos materiales u otros tipos de fibras y resinas pertinentes para la aplicación objetivo y se logre una disminución de la masa tanto del marco como del vehículo.

Referencias

- [1] IQAir, «2022 WORLD AIR QUALITY REPORT Region & City PM2.5 Ranking,» *WORLD AIR QUALITY REPORT*, p. 5; 11, 2022.
- [2] Sistema Nacional de Información Ambiental, «Indicador: Vehículos por cada mil habitantes,» Ministerio del Ambiente del Perú, 2016. [En línea]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/966>.
- [3] K. Guardia, «GESTIÓN,» Diario GESTIÓN - ECONOMÍA, 24 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://gestion.pe/economia/1-1-limenos-desplaza-bicicleta-acudir-centro-laboral-264921-noticia/?ref=gesr>.
- [4] E. Kirschbaum, «LOS ANGELES TIMES,» LOS ANGELES TIMES, 08 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.latimes.com/world-nation/story/2019-08-07/copenhagen-has-taken-bicycle-commuting-to-a-new-level>.
- [5] A. Gil, «Resinas de poliéster - Guía de manejo,» 2012.
- [6] «Fibra de Vidrio - Especificaciones Técnicas».
- [7] A. S. Whitman, «A Systematic Approach to Human Powered Vehicle Design with an Emphasis on Providing Guidelines for Mentoring Students,» Clemson University, 2016.
- [8] A. Dalal, «Design and Fabrication of a Human Powered Vehicle,» Delft University of Technology, 2017.
- [9] A. Fisher, A. Sahyoun, B. Taylor y C. Toy, «One-Ride Human Powered Vehicle,» Santa Clara University, 2015.
- [10] T. G. Yashas Gowda, M. R. Sanjay, K. Subrahmanya Bhat, P. Madhu, P. Sentharamaikkannan y B. Yogesha, «Polymer Matrix-Natural Fiber Composites: An Overview,» Cogent Engineering, India, 2018.
- [11] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf y D. F. Mazurek, *Mecánica de Materiales 5ta Edición*, McGrawHill.
- [12] R. C. Hibbeler, *Engineering mechanics: Dynamics*, 12th edition, Pearson Education, Inc.
- [13] W. H. P. V. Association, «World Human Powered Vehicle Association,» [En línea]. Available: <http://www.whpva.org/hpv.html>.
- [14] H. Bikes, «HASE BIKES,» [En línea]. Available: <https://www.sunseeker.bike/index.php/products/eco-delta-sx/>.
- [15] R. Wianeck, «Cafe Daum,» [En línea]. Available: https://m.cafe.daum.net/circlelove-/21YM/77?q=D_nkDM8IgstNA0&.
- [16] Ingemecanica, «Ingemecanica,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>.

- [17] F. S.A.S., «FIBRASA S.A.S.,» [En línea]. Available: <https://www.fibrasa.com.co/make-the-most-of-the-season-by-following-these-simple-guidelines>.
- [18] Fibraplus, «FibraPlus.com,» [En línea]. Available: fibraplus.com/las-fibras-vidrio-especiales.
- [19] T. d. l. Plásticos, «Fibra de vidrio,» [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html#:~:text=El%20vidrio%20S%20es%20una,que%20destruyen%20el%20vidrio%20E..>
- [20] P. CAMPS, «PEREZ CAMPS,» [En línea]. Available: <https://blog.perezcamps.com/tipos-resinas/>.
- [21] P. Castilla, Interviewee, *Zágita, vehículo a tracción humana por Paolo Castilla..* [Entrevista]. 26 agosto 2021.
- [22] sunseeker, «sunseeker,» sunseeker, [En línea]. Available: <https://www.sunseeker.bike/index.php/products/eco-delta-sx/>.
- [23] H. BIKES, «TRIX - User's Manual,» Alemania, 2021.
- [24] H. BIKES, «TRIGO UP - User's Manual,» Alemania, 2021.
- [25] A. C. Gross, C. R. Kyle y D. J. Malewicki, «The Aerodynamics of Human-powered Land Vehicles,» de *SCIENTIFIC AMERICAN LIBRARY*, Estados Unidos de America, SCIENTIFIC AMERICAN LIBRARY, 1983, pp. 142 - 152.
- [26] D. Too y G. E. Landwer, «The Biomechanics of Force and Power Production in Human Powered Vehicles,» *HUMAN POWER - TECHNICAL JOURNAL OF THE HUMAN POWERED VEHICLE ASSOCIATION*, nº 55, pp. 2 - 6, 2003 - 2004.
- [27] D. Too, «THE EFFECT OF BODY CONFIGURATION ON CYCLING PERFORMANCE,» Department of Kinesiology - University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 1990.
- [28] A. Dunford, «Bicycles Network Australia,» 11 Diciembre 2015. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3w6X4F2>.
- [29] B. Ferrer Roca y J. García-Lopez, «Comparación de diferentes métodos de ajuste de la bicicleta en ciclistas entrenados: influencia de factores biomecánicos y energéticos,» España, 2017.
- [30] S. C. Bonzheim, B. A. Franklin, C. DeWitt, C. Marks, B. Goslin, R. Jarski y S. Dann, «Physiologic Responses to Recumbent Versus Upright Cycle Ergometry, and Implications for Exercise Prescription in Patients with Coronary Artery Disease,» *THE AMERICAN JOURNAL OF CARDIOLOGY*, 1992.
- [31] I. W. Taifa y D. A. Desai, «Anthropometric measurements for ergonomic design of students' furniture in India,» *ELSEVIER*, p. 8, 2016.
- [32] S. Asgari, Y. Luo, G. M. Belbin, E. Bartell, R. Calderon, K. Slowikowski, C. Contreras, R. Yataco, J. T. Galea, J. Jimenez, J. M. Coit, C. Farroñay, O'Connor, T. D. O'Connor, H. C. Dietz, J. Hirschhorn, H. Guio, L. Lecca, E. E. Kenny, E. Freeman, M. B. Murray y S. Raychaudhuri, «A positively selected, common, missense variant in FBN1 confers a 2.2 centimeter reduction of height in the Peruvian population,» USA, 2019.

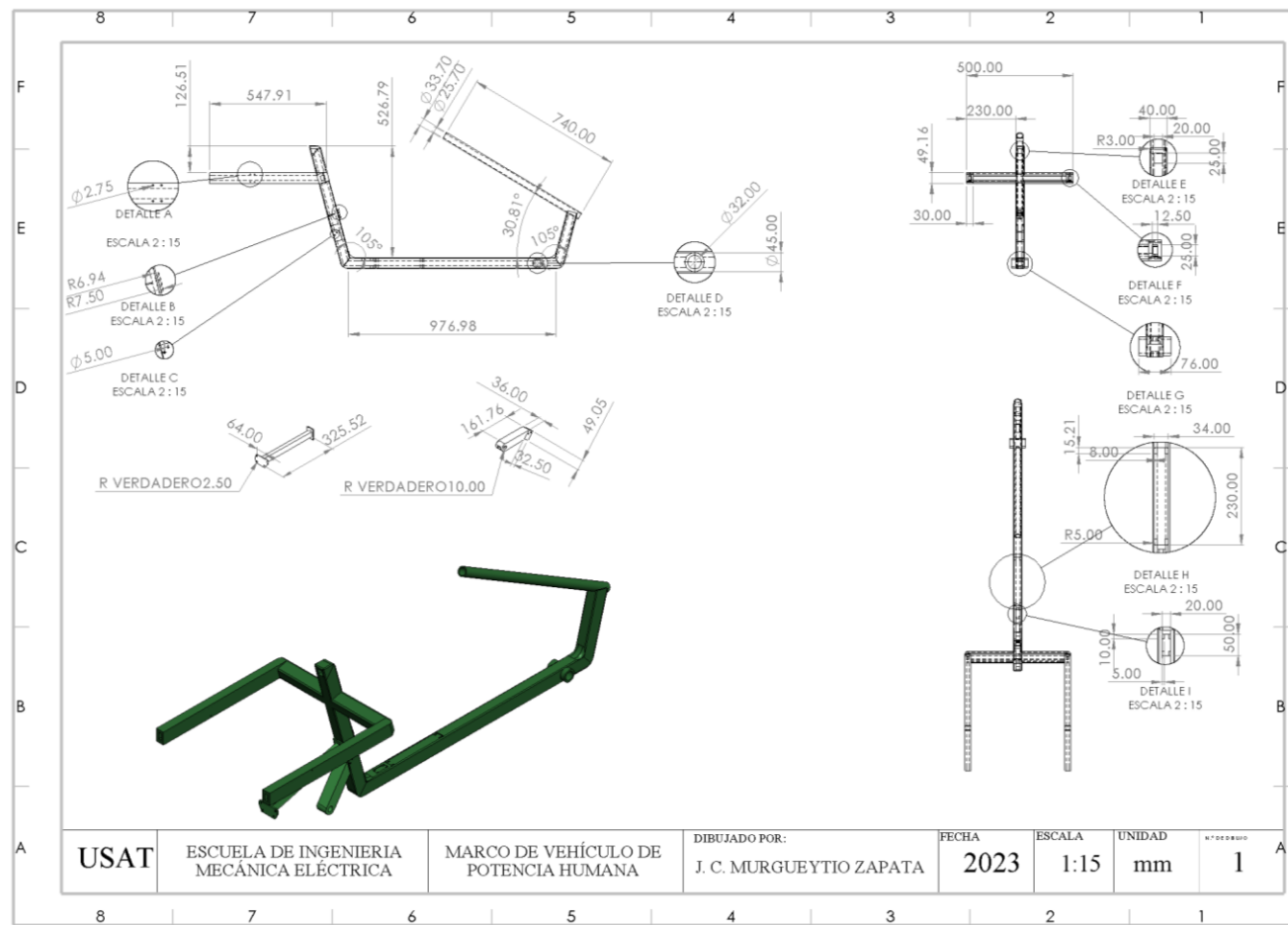
- [33] C. M. Escobar Galindo, «PERFIL ANTROPOMETRICO DE TRABAJADORES DEL PERU UTILIZANDO EL METODO DE ESCALA PROPORCIONAL,» Ergonomía, Investigación y Desarrollo, Nottingham, United Kingdom, 10/07/2020.
- [34] L. Carmenate Milián, F. A. Moncada Chévez y E. W. Borjas Leivas, *MANUAL DE MEDIDAS ANTROPOMÉTRICAS*, Costa Rica: SALTRA, 2014.
- [35] F. Santos, Artist, *Modelo de Humano 100% Articulado (Dummy)*. [Art]. GRABACAD, 2015.
- [36] N. Salazar Medina, M. Henrich Saavedra, P. Larios Francia y M. Reaño Vera, «Diseño de un método para la determinación de las medidas antropométricas para ser usadas en el tallaje de la población peruana,» G&G Consultores Asociados, Lima, 2018.
- [37] F. A. Pastor Valles y L. A. Espejo Arco, «Diseño antropométrico del mobiliario de estudio para alumnos universitarios en Perú,» Piura, 2020.
- [38] U. D. O. H. A. H. SERVICES, «Anthropometric Reference Data for Children and Adults: United States, 2007–2010,» United States of America, 2012.
- [39] A. Goswami, S. Ganguli, K. S. Bose y B. B. Chatterjee, «Anthropometric analysis of tricycle designs,» Applied Ergonomics, India, 1986.
- [40] J. G. d. I. F. Costales, «Diseño de Materiales Compuestos,» Departamento de Mecánica Aplicada - Instituto Superior Politécnico José A. Echevarría, La Habana, 2011.
- [41] C. E. 2019, «Polyester (cast, rigid),» CES EduPack 2019, 2019.
- [42] C. EduPack, «Glass, S grade fiber,» CES EduPack2019, 2019.
- [43] E. J. Barbero, FINITE ELEMENT ANALYSIS OF COMPOSITE MATERIALS, West Virginia, USA: Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, 2008.
- [44] C. E. y J. C. Murgueytio Zapata, «Pmarco-Smarco-Pmarco-Smarco-Pmarco-Smarco-Pmarco,» 2021.
- [45] R. L. Mott, *Diseño de elementos de maquinas*, 2006, pp. 185-197.
- [46] N. a. M. UMC+, «Nutritional assessment Maastricht UMC+,» [En línea]. Available: <https://nutritionalassessment.mumc.nl/en/body-composition>.
- [47] CES EDUPACK, «Informe de material,» CES EDUPACK, 2019.
- [48] Coppermetal, «Coppermetal,» 12 enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.coppermetal.com.br/es/blog/todo-sobre-aluminio-7075/>.
- [49] D. bici, «DAIGORO bici,» [En línea]. Available: <https://store.daigoro-bici.com/CONOCIENDO-EL-CROMOLY>.
- [50] S. A. C. Overview, «FASTWAY ENGINEERING,» [En línea]. Available: <https://www.fastwayengineering.com/solidworks-cad-cae-overview/>.
- [51] MATLAB, «MathWors,» MATLAB, [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>.

- [52] J. Uda y J. García de Jalón , «ANALISIS CINEMATICO Y DINAMICO DE SISTEIMAS MECANICOS FORMADOS POR VARIOS SOLIDOS RIGIDOS,» Univasitat Politkenica de Catalunya (España), 1985.

ANEXOS

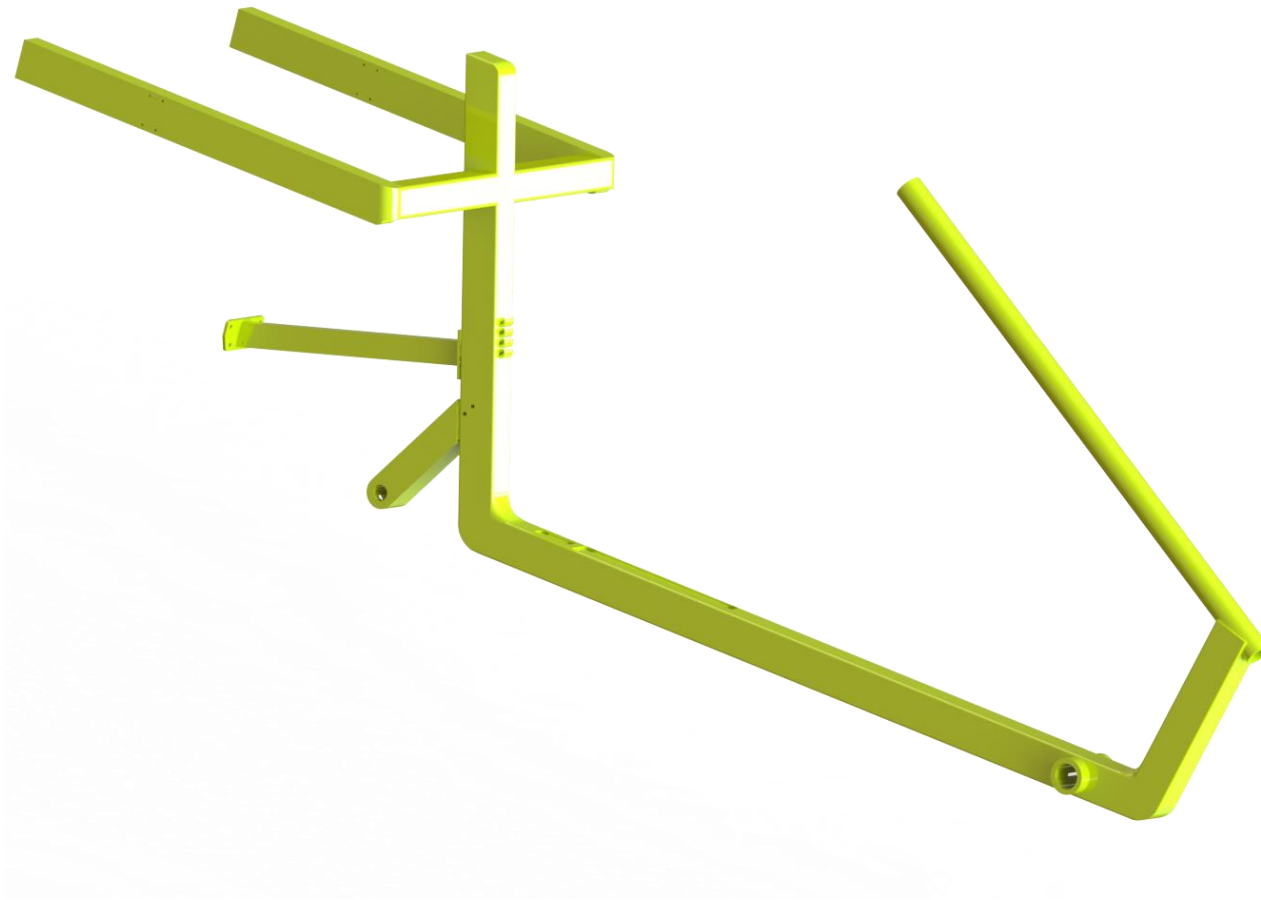
Anexo 1

Plano del marco de vehículo de potencia humana



Anexo 2

Renderizado de marco de vehículo de potencia humana estilo delta



Anexo 3

Renderizado de vista explosionada de vehículo de potencia humana estilo delta



Anexo 4

Renderizado de diseño de vehículo de potencia humana estilo delta

