

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



**Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP para aumentar la vida útil**

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

**AUTOR**

**Joseph Amberly Requejo Torres**

**ASESOR**

**Alejandro Segundo Vera Lazaro**

**<https://orcid.org/0000-0003-0198-338X>**

**Chiclayo, 2026**

**Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando  
materiales CFRP para aumentar la vida útil**

PRESENTADA POR

**Joseph Amberly Requejo Torres**

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

**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

APROBADA POR

Dante Omar Panta Carranza  
PRESIDENTE

Lucio Antonio Llontop Mendoza  
SECRETARIO

Alejandro Segundo Vera Lazaro  
VOCAL

## **Dedicatoria**

Dedicado para mi abuela Carmen Lucia Dionicio Córdova y en memoria a mi abuelo Juan Jesús Torres Campos.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por escuchar mis oraciones, además a mis padres, María Elizabeth Torres Dionicio y Rosendo Requejo Mejía, por ser el ejemplo de vida, también, agradecer a mis hermanos Renzo Requejo Torres y Rosymar Requejo Torres y familia en general por ser mi fortaleza.

# Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP para aumentar la vida útil

## INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

14%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

7%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://tesis.usat.edu.pe">tesis.usat.edu.pe</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="https://es.slideshare.net">es.slideshare.net</a> Fuente de Internet	3%
3	Submitted to Universidad de Cádiz Trabajo del estudiante	1%
4	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://aspersorasagricolas.com">aspersorasagricolas.com</a> Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universitat Politècnica de València Trabajo del estudiante	1%
7	<a href="https://rcta.unah.edu.cu">rcta.unah.edu.cu</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://safetyculture.com">safetyculture.com</a> Fuente de Internet	<1%
9	<a href="https://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1%

## Índice

<b>RESUMEN.....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1. REALIDAD O PROBLEMÁTICA .....	11
2. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	11
3. OBJETIVOS .....	12
3.1. <i>Objetivo General</i> .....	12
3.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	12
4. JUSTIFICACIÓN .....	12
4.1. <i>Económico</i> .....	12
4.2. <i>Social</i> .....	12
4.3. <i>Ambiental</i> .....	13
4.4. <i>Tecnológico</i> .....	13
<b>REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
1. ANTECEDENTES.....	14
2. EL TRACTOR AGRÍCOLA .....	15
3. TREN DELANTERO DEL TRACTOR AGRÍCOLA.....	16
4. SISTEMA DE DIRECCIÓN. ....	16
5. FUNCIONES DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN. ....	17
5.1. <i>Terminal de dirección</i> .....	18
5.2. <i>Norma internacional ISO 286</i> .....	19
5.3. <i>Mantenimiento de los tractores agrícolas John Deere.</i> .....	21
5.4. <i>Mantenimiento de los tractores agrícolas Kubota</i> .....	21
5.5. <i>Mantenimiento de los tractores agrícolas Massey Ferguson.</i> .....	22
5.6. <i>Esfuerzo</i> .....	23
5.7. <i>Matemáticamente el esfuerzo normal se expresa:</i> .....	24
5.8. <i>Esfuerzo máximo Von Mises</i> .....	24
5.9. <i>Factor de Seguridad</i> .....	24
5.10. <i>Fatiga.</i> .....	25
5.11. <i>Diagrama S-N (Esfuerzo - Vida)</i> .....	26

5.12.	<i>Diagrama <math>\sigma</math>-<math>\varepsilon</math> (Esfuerzo – Deformación)</i>	26
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>		<b>27</b>
6.	<b>METODOLOGÍA</b>	27
6.1.	<i>Tipo de investigación</i>	27
6.2.	<i>Tipo de proyecto</i>	27
6.3.	<i>Técnicas e instrumentos</i>	27
6.4.	<i>Población y Muestra</i>	27
6.4.1.	<i>Población</i>	27
6.4.2.	<i>Muestra</i>	27
6.4.3.	<i>Variables y operacionalización</i>	28
6.5.	<i>Diagrama de flujo</i>	29
6.6.	<i>Hipótesis</i>	30
6.7.	<i>Operación de variables</i>	31
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		<b>34</b>
7.	<b>DIAGNOSTICAR EL ESTADO ACTUAL DEL TERMINAL DE DIRECCIÓN EN LOS TRACTORES AGRÍCOLAS DE LA CIUDAD DE PIURA PARA EL REQUERIMIENTO DEL NUEVO MATERIAL.</b>	34
7.1.	<i>Matriz de fallas del terminal de dirección</i>	34
7.2.	<i>Matriz de necesidades – métricas</i>	35
7.3.	<i>Parque de tractores agrícolas en la ciudad de Piura.</i>	36
8.	<b>SELECCIONAR EL MATERIAL COMPUESTO ENTRE LOS DISTINTOS TIPOS DE FIBRA DE CARBONO EN EL SOFTWARE CES EDUPACK</b>	37
9.	<b>DISEÑAR Y SIMULAR POR FATIGA EL TERMINAL DE DIRECCIÓN DEL TRACTOR AGRÍCOLA CON MATERIALES COMPUESTOS CFRP.</b>	39
9.1.	<i>Fases del proceso del diseño</i>	39
9.2.	<i>Comprensión de la solicitud</i>	40
9.2.1.	<i>Lista de Exigencias</i>	40
9.2.2.	<i>Concepción de la solución</i>	41
9.3.	<i>Elaboración del proyecto</i>	43
9.3.1.	<i>Geometría del diseño seleccionado</i>	47
9.3.2.	<i>Diagrama de cuerpo libre</i>	50
9.3.3.	<i>Características para el análisis</i>	53
10.	<b>ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA DEL TERMINAL DE DIRECCIÓN CON MATERIAL AISI 4340 ACERO MEDIANTE EL SOFTWARE SOLIDWORKS</b>	57

10.1.	<i>Distribución de tensiones.</i>	57
10.2.	<i>Desplazamiento</i>	58
10.3.	<i>Deformaciones unitarias</i>	58
10.4.	<i>Factor de seguridad</i>	59
10.5.	<i>Daño acumulado</i>	59
10.6.	<i>Vida Total</i>	60
10.7.	<i>Factor de Carga</i>	60
10.8.	<i>Indicador de Biaxialidad</i>	61
<b>11.</b>	<b>ANÁLISIS DE FALLA POR FATIGA DEL TERMINAL DE DIRECCIÓN CON COJINETES DE MATERIAL EPOXY REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO DE 75% DE FACTOR VOLUMÉTRICO MEDIANTE EL SOFTWARE SOLIDWORKS.</b>	<b>61</b>
11.1.	<i>Distribución de tensiones</i>	61
11.2.	<i>Desplazamiento</i>	62
11.3.	<i>Deformaciones unitarias</i>	63
11.4.	<i>Factor de seguridad</i>	63
11.5.	<i>Daño acumulado</i>	64
11.6.	<i>Vida Total</i>	64
11.7.	<i>Factor de Carga</i>	65
11.8.	<i>Indicador de Biaxialidad</i>	65
<b>12.</b>	<b>COMPARAR EL AUMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE LA PIEZA MECÁNICA UTILIZANDO MATERIALES COMPUESTOS CFRP CON RESPECTO AL MATERIAL ORIGINAL.</b>	<b>66</b>
12.1.	<i>Estructurar el costo del diseño propuesto.</i>	66
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>70</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>71</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>72</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>74</b>

## Resumen

Para el desarrollo, se diagnosticó el estado de terminales de dirección mediante revisión de manuales y fichas técnicas de los tractores agrícolas con lo que se determinó que el terminal de dirección es de una “sola vida” por lo que quiere decir que es no reparable, con lo que mediante matrices de necesidades se determinó que el límite de fluencia debe superar los 1500 MPa debido al material original, con lo que hizo uso de materiales CFRP por su límite de fluencia superior a los 1800 MPa. Para el diseño se utilizó la metodología VDI 2222 con lo que se logró diseñar el terminal de dirección con cojinetes reparables y poder simularlo por fatiga bajo el criterio de Goodman. Por consiguiente, el análisis dio como resultado  $1,727 \times 10^5$  ciclos para el acero AISI 4340 y  $1,000 \times 10^{11}$  ciclos para el epoxy reforzado con fibra de carbono. Por último, se realizó la estructura de costos con el cual se determina que el diseño propuesto con materiales CFRP aumenta su valor en un 20 % en comparación al de venta comercial.

**Palabras clave:** Terminal de dirección, fatiga, tractor agrícola, material compuesto CFRP, vida útil, fibra de carbono, matriz polimérica.

## Abstract

For the development, the state of the steering terminals was diagnosed by reviewing manuals and technical sheets of agricultural tractors, which determined that the steering terminal is of a "single life" which means that it is not repairable, with which through needs matrices it was determined that the yield limit must exceed 1500 MPa due to the original material. with which it made use of CFRP materials due to its yield limit greater than 1800 MPa. For the design, the VDI 2222 methodology was used, which made it possible to design the steering terminal with repairable bearings and to be able to simulate it by fatigue under Goodman's criteria. Consequently, the analysis resulted in  $1,727 \times 10^5$  cycles for AISI 4340 steel and  $1,000 \times 10^{11}$  cycles for carbon fiber-reinforced epoxy. Finally, the cost structure was made with which it is determined that the proposed design with CFRP materials increases its value by 20% compared to that of commercial sale.

**Keywords:** Steering terminal, fatigue, agricultural tractor, CFRP composite material, service life, carbon fiber, polymer matrix.

## Introducción

La maquinaria agrícola es cualquier tipo de equipo utilizado para apoyar los procesos agrícolas. Hay muchos tipos diferentes de herramientas utilizadas por los agricultores, incluidas herramientas manuales y herramientas eléctricas. Un ejemplo típico de maquinaria agrícola es un tractor. Un tractor agrícola es un vehículo grande de carga pesada que puede equiparse con implementos agrícolas para maximizar las capacidades del tractor [1].

En el tren delantero de los tractores agrícolas, en cada una de sus barras direccionales, existe un juego de rótula y debe lubricarse con grasa cada 10 horas de trabajo. Al mismo tiempo se tiene cuidado de revisar los ejes y terminales de dirección y en caso necesario reemplazar o corregir estas piezas mecánicas. De lo contrario, en algún momento se puede perder la dirección y el control del tractor, lo que puede provocar un accidente peligroso [2].

La dirección de un vehículo se compone de un volante conectado a un extremo de la columna de dirección, que a su vez está unida al mecanismo de dirección en su caja correspondiente. Su principal función es orientar las ruedas para que el vehículo siga la trayectoria deseada. Este proceso implica la utilización de diversos componentes que transfieren el movimiento desde el volante hasta las ruedas [3].

Este sistema de dirección debe cumplir ciertas funciones como: Evitar cualquier juego en la dirección, asegurando que el giro del volante se traduzca directamente en el giro de las ruedas. El mecanismo debe ser fácil de maniobrar, ni demasiado rígido por cuestiones de comodidad ni muy suave por razones de seguridad. La precisión es fundamental para que el vehículo siga la trayectoria deseada por el conductor, generando confianza en su manejo. Se requiere cierto grado de irreversibilidad para evitar que movimientos no deseados de las ruedas se transmitan al volante, como en el caso de un bache repentino. Es esencial que no se transmitan vibraciones al volante y que el sistema garantice altos estándares de seguridad para prevenir roturas [4].

El creciente aumento de demandas en la industria automotriz, enfocado en la confiabilidad, la extensión de los períodos de garantía, la resistencia en entornos extremos, la calidad superior de los diversos componentes, y la reducción en los tiempos de diseño y producción, entre otros aspectos, hace necesario llevar a cabo una cantidad significativa de pruebas para componentes de seguridad como las rótulas y las terminales de dirección y suspensión. Las pruebas que mejor

ilustran el comportamiento de estas piezas son las pruebas de vida o de fatiga, donde se recrean las condiciones normales de funcionamiento a las que estarán expuestas, permitiendo evaluar su rendimiento en condiciones simuladas [5].

Los terminales de dirección están compuestos por un muñón cónico que tiene en sus extremos una conexión roscada para su desmontaje, que facilita la unión flexible. Su función principal es establecer una unión flexible entre la caja de dirección y los brazos de acoplamiento de las ruedas [3].

Ante este escenario se plantea la siguiente pregunta: ¿En qué medida el diseño del terminal de dirección utilizando materiales compuestos CFRP permitirá aumentar la vida útil? Ante este dilema se plantea la siguiente tesis: Diseñar el terminal de dirección y utilizar materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra de carbono para el análisis por fatiga. Para el fundamento de tesis, se tratará la selección del material CFRP se analizó mediante cuadros de límite elástico vs precio, además, para el diseño del terminal de dirección se basó en la metodología Verein Deutscher Ingenieure (VDI 2222) y para el análisis de fatiga por el criterio de Goodman.

#### 1. Realidad o Problemática

Los tractores agrícolas en la actualidad cuentan con terminales de dirección tradicional, siendo su composición una rotula conformada por un eje y una base, las cuales por el trabajo del vehículo están expuestas a diversas fuerzas (radial, axial y torsional) por lo que se presentará falla por fatiga. Estos terminales de dirección vienen siendo un gasto al propietario del vehículo por presentar fallas prematuras. Ante esta situación, la presente investigación busca aumentar la vida útil diseñando la pieza utilizando materiales CFRP.

#### 2. Pregunta de Investigación

¿En qué medida el diseño del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP aumentará su vida útil?

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo General

- Diseñar el terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP para aumentar su vida útil.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual del terminal de dirección en los tractores agrícolas de la ciudad de Piura para el requerimiento del nuevo material.
- Analizar y seleccionar el material CFRP.
- Diseñar y simular por fatiga el terminal de dirección del tractor agrícola con materiales CFRP.
- Comparar el aumento de la vida útil de la pieza mecánica utilizando materiales compuestos CFRP con respecto al material original.
- Estructurar el costo del diseño propuesto.

### 4. Justificación

#### 4.1. Económico

Con respecto al ámbito económico, se debe comparar el precio de trabajo-hombre, agregado al costo del recambio de las piezas mecánicas y las pérdidas de horas-maquinas que se genera al encontrarse el vehículo en proceso de reparación a causa de fallas mecánicas por fatiga.

#### 4.2. Social

Para el ámbito social, el prolongar la vida útil de componentes mecánicos y reducir las horas de maquina parada es vital para la contribución de comunidades que viven del trabajo en tierras agrícolas, ya que mediante estas máquinas se puede preparar las tierras agrícolas para la siembra de productos de consumo humano a grandes escalas.

#### 4.3. Ambiental

En el tema ambiental, se debe considerar la reducción de residuos sólidos en el medio ambiente, lo que genera un impacto negativo al agotar recursos naturales para procesos de fabricación.

#### 4.4. Tecnológico

En lo tecnológico, bien se sabe que las áreas rurales en las que trabajan los vehículos se tiene un acceso limitado en tecnologías para la rápida reparación de estos tipos de vehículos de trabajo moderno, es por esto, que al reducir la brecha tecnológica es esencial evitar el recambio de componentes mecánicos, en donde se garantice el acceso continuo de la maquinaria.

## Revisión de literatura

### 1. Antecedentes

En [6] se desarrolla el diseño de una barra estabilizadora elaborada con un material compuesto CFRP de matriz vinílica, orientado a mejorar la durabilidad del componente en un vehículo Toyota Yaris GR. El estudio contempla la evaluación del comportamiento estructural mediante análisis estáticos en los puntos de anclaje, así como un análisis de fatiga para estimar la vida útil del diseño, complementado con un análisis económico. La selección del material se realizó utilizando el software Ansys Granta EduPack, priorizando la relación entre propiedades mecánicas y costo, lo que permitió identificar un compuesto reforzado con fibra de carbono con una fracción volumétrica del 85 %, sirviendo como referencia metodológica para la presente investigación.

En [7] se presenta una investigación de tipo no experimental y descriptivo basada en la revisión de literatura especializada, orientada al análisis del uso de polímeros reforzados con fibra de carbono como técnica de reforzamiento estructural. El estudio se enfoca en su aplicación en estructuras de concreto armado, destacando que estos materiales presentan un adecuado desempeño mecánico, alta resistencia frente a la corrosión y estabilidad ante variaciones térmicas, además de ventajas asociadas a su bajo peso y facilidad de aplicación. Asimismo, se señala que los CFRP poseen una ductilidad inferior al 1 %, lo que favorece su adaptación a diferentes configuraciones estructurales.

En [8] se realiza un análisis comparativo del comportamiento mecánico de una ballesta automotriz fabricada en fibra de carbono y en acero AISI 5160, mediante un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental de tipo transversal. Los resultados evidencian que el acero presenta mayores valores de límite elástico, resistencia a la tracción y módulo elástico; sin embargo, se determina que la ballesta de fibra de carbono cumple con las condiciones de carga estática requeridas para su aplicación en vehículos tipo pickup, aportando además una reducción significativa del peso en el sistema de suspensión.

En [9] se analiza el empleo de polímeros reforzados con fibra (FRP) como alternativa para el reforzamiento de estructuras de concreto, con el objetivo de ampliar el conocimiento sobre el diseño de elementos estructurales reforzados con este tipo de materiales. A partir de la revisión

de documentación técnica, se identifican como principales variantes el GFRP, AFRP y CFRP, cada una con propiedades mecánicas y aplicaciones específicas. El estudio resalta que el CFRP presenta la mayor eficiencia estructural debido a su elevada relación resistencia-peso y alto módulo elástico, lo que permite el diseño de estructuras más livianas, como puentes peatonales. Asimismo, se destaca que los materiales compuestos presentan propiedades anticorrosivas que reducen el deterioro estructural y permiten alcanzar una vida útil aproximada de 50 años con mínimos requerimientos de mantenimiento, consolidando al CFRP como una alternativa eficiente para el reforzamiento estructural.

## 2. El tractor Agrícola

Es un vehículo autopropulsado de gran torque especializado utilizado para remolcar o empujar cargas pesadas, equipos agrícolas u otros remolques, esto se debe gracias a sus grandes ruedas que se adhieren fuertemente al terreno en el que se encuentre. Actualmente, es una herramienta de trabajo distintiva de la agricultura y prácticamente todas las explotaciones agrícolas cuentan con al menos uno. A lo largo del tiempo, ha reemplazado a animales como caballos, toros y bueyes, que solían utilizarse para labores de arado y transporte de elementos necesarios para preparar la tierra antes del cultivo, así como para proporcionar fuerza en general en las tareas agrícolas. Dado su papel fundamental en las operaciones agrícolas, los agricultores optan por utilizar el tractor como herramienta de trabajo. Por lo tanto, es importante analizar sus características mecánicas y, si es posible, mejorar su comodidad y facilidad de uso al ponerlo a prueba en el terreno [10] [11].

*Ilustración 1: Tractor Agrícola*

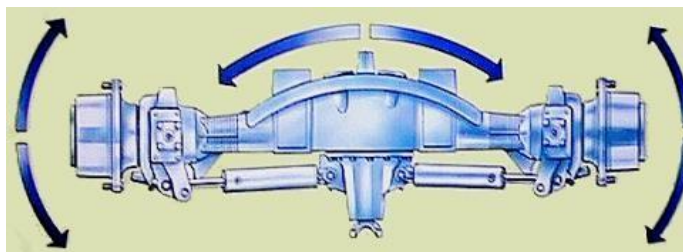


*Fuente: INSL*

### 3. Tren delantero del tractor agrícola

El sistema frontal del tren de rodaje consiste en dos semiejes y un eje principal que se fija al soporte frontal del chasis del tractor mediante un perno de soporte que le permite pivotar y ajustarse a las variaciones del terreno. Este perno de apoyo incorpora casquillos que permiten su rotación y un dispositivo de engrase que permite lubricar su desplazamiento [11].

*Ilustración 2: Eje delantero 4 R.M.*



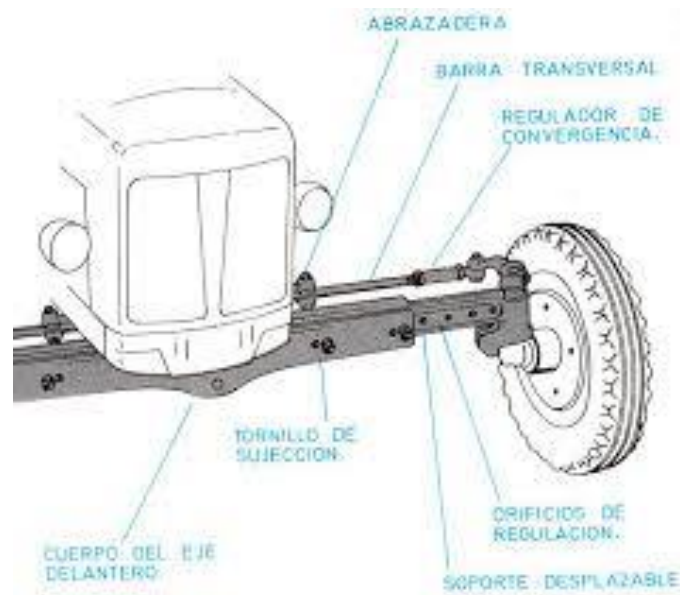
*Fuente: Universidad de Almería*

En cada uno de los lados del eje principal, se encuentran los semiejes, en donde existe un tubo vertical en su parte exterior, con la función de sostener la mangueta en el momento del giro que es controlado por la palanca de dirección. Para facilitar este giro, se utilizan casquillos, rótulas y terminales de dirección.

### 4. Sistema de Dirección.

Conformado por un volante fijado a la columna de dirección mediante una tuerca, donde la columna actúa como un eje que transmite el movimiento generado por el conductor hacia la caja de dirección. En el interior de esta última se aloja un conjunto mecánico encargado de controlar el ángulo de giro y transformar el movimiento rotacional en un desplazamiento lateral, el cual se transmite a las ruedas directrices a través del brazo de dirección [12].

*Ilustración 3: Componentes del sistema de dirección.*

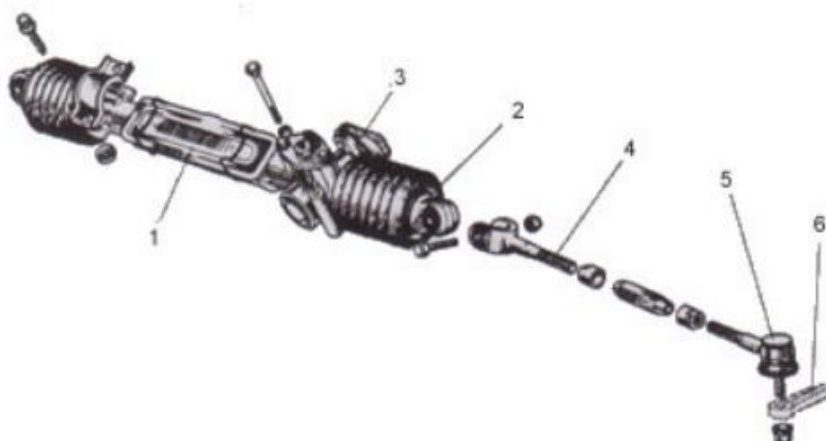


*Fuente: Unidad de aprendizaje.*

## 5. Funciones del sistema de dirección.

En la ilustración 4 se aprecia cómo la barra de dirección (1) se vincula directamente con los brazos de las ruedas (6) mediante bieletas o barras de acoplamiento (4). Estas bieletas se unen en un extremo a la barra de dirección (2) y, en el extremo opuesto, al brazo de la rueda (6) a través de rótulas (5), lo que permite realizar ajustes en la alineación de la conexión con las ruedas. Este conjunto lineal transmite de manera directa el movimiento desde la barra de dirección hasta las ruedas delanteras [13].

*Ilustración 4: Partes del sistema de dirección.*



*Fuente: U de Santiago de Chile.*

### 5.1. Terminal de dirección

Es una articulación esférica (rotula) empleadas en los sistemas de dirección con la función de transmitir las cargas axiales; además de absorber cargas causadas por el movimiento del vehículo con la propiedad de irreversibilidad de estas cargas hacia el volante. Estos terminales de dirección están sometidas a cargas variables.

Las cargas máximas permitidas en los terminales de dirección se demuestran en la tabla 1, donde según el peso del vehículo se determina el diámetro del eje esférico, además de las fuerzas radiales, axiales y de torsión que actúan sobre esta [13][14].

*Tabla 1: Cargas máximas permitidas*

Diámetro de la esfera $\varnothing$	$\varnothing 27$	$\varnothing 30$	$\varnothing 35$	$\varnothing 40$
Carga media (Fm)(N)	5000	10000	20000	30000
F1 (KN)(radial)	$\pm 7$	$\pm 12$	$\pm 18$	$\pm 22$
F2 (KN)(axial)	$\pm 10$	$\pm 15$	$\pm 20$	$\pm 25$
T(N.m)(torsión)	$\pm 5$	$\pm 6$	$\pm 7$	$\pm 9$
Peso del vehículo bruto (Kg)	<2000	2000 a 3000	3000 a 4000	4000 a mas

*Fuente: University of Çukurova.*

## 5.2. Norma internacional ISO 286

La norma internacional ISO 286, donde muestra 18 índices de tolerancia para los ejes con respecto al agujero, en donde se aplican según su función.

*Tabla 2: Índice de tolerancia.*

IT 01 – IT 0	Especial precisión. Patrones.
IT 1 – IT 3	Calibres y piezas de gran precisión.
IT 4 – IT 11	Piezas o elementos que han de ajustar
IT 12 – IT 18	Superficies libres.

*Fuente: Normas ISO.*

Los terminales dirección son piezas de superficies libres por lo que se toma las tolerancias de la tabla desde IT12 a IT18 [15].

Tabla 3: Indicador de tolerancia

Grado Tolerancia Diametro (mm)	IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
$d \leq 3$	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	1000	1400
$3 < d \leq 6$	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	1200	1800
$6 < d \leq 10$	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	2200
$10 < d \leq 18$	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	2700
$18 < d < 30$	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	530	840	1300	2100	3300
$30 < d \leq 50$	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900
$50 < d \leq 80$	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600
$80 < d \leq 120$	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400
$120 < d \leq 180$	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
$180 < d \leq 250$	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	7200
$250 < d \leq 315$	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	8100
$315 < d \leq 400$	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	8900
$400 < d \leq 500$	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	9700

Fuente: ISO 286

## 5.3. Mantenimiento de los tractores agrícolas John Deere.

Tabla 4: Ficha de mantenimiento tractor John Deere.

SE REQUIERA				
Núm.	Puntos de engrase y entretenimiento	Descripción	Capacidad	Descripción del fabricante
1	Frenos hidráulicos	Purgar el sistema si es necesario		
2	Embrague	Revisar el recorrido libre del pedal		
DIARIAMENTE O CADA 10 HORAS				
3	Aceite motor	Comprobar nivel	Entre ambas marcas de sonda	
4	Filtro de aire en baño de aceite	Comprobar nivel	Entre ambas marcas	El mismo del motor
5	Radiador	Comprobar nivel. Quitar basura del panel		
6	Eje delantero	Lubricar engrasadores		Grasa

Fuente: John Deere.

## 5.4. Mantenimiento de los tractores agrícolas Kubota

Tabla 5: Ficha de mantenimiento tractor Kubota.

Nº	Situación	Capacidades	Lubricantes	
1	Combustible	Dependiendo el modelo	Gasóleo nº 2 – D Gasóleo nº 1 – D si la temperatura es inferior a -10 °C	
2	Refrigerante		Agua dulce limpia con anticongelante	
3	Cárter del motor (con		Aceite del motor: Clasificación de servicio API CD, CE o CF	
		Por encima de 25 °C	SAE30, SAE 10W – 30 o 15W - 40	

	filtro)		Entre -10 °C y 25 °C	SAE20, SAE 10W – 30 o 15W - 40
			Por debajo de -10 °C	SAE 10W – 30
4	Caja de la transmisión		KUBOTA UDT o aceite Super UDT*	
5	Aceite de la caja del eje delantero		Aceite KUBOTA UDT o SUPER UDT* o aceite para engranajes SAE 80 – SAE 90	
6	Engrase	N° de punto de engrase	Capacidad	
	Soporte del cárter de la rueda delantera	2	Hasta que rebose lagrasy.	Grasa multiusos NLGI – 2 O NLGI – 1 (GC – LB)
	Soporte del eje delantero	2		
	Tercer punto	2		
	Soporte del tercer punto	2 (con control de esfuerzos, si está montado)		
	Tirantes de elevación	1		
	Terminales de la batería.	2	Una pequeña cantidad	

*Fuente. Tractor Kubota*

### 5.5. Mantenimiento de los tractores agrícolas Massey Ferguson.

*Tabla 6: Ficha de mantenimiento tractor Massey Ferguson*

Mantenimiento Periódico	10h o diario
Eje delantero y Dirección	
Lubrique con grasa las uniones universales del eje delantero.	X
Lubrique los pivotes de dirección.	X
Inspeccione la holgura de los pivotes de dirección y cubos de las ruedas delanteras.	X

*Fuente: Massey Ferguson*

Tomando como ejemplo el caso del tractor Massey Ferguson, muestra el mantenimiento periódico que se debe realizar cada 10 horas o diariamente a los componentes que abarca el tren delantero.

Los tractores agrícolas expuestos, muestran los periodos de lubricación en el tren delantero, dejando de lado el mantenimiento del terminal de dirección que es la base del mecanismo, por lo que se infiere que el componente mecánico es de “una sola vida”, siendo así que el material con el que se debe fabricar debe tener un grado de resistencia a fluencias y tracción y así poder aumentar la vida útil del componente mecánico [16][17][18].

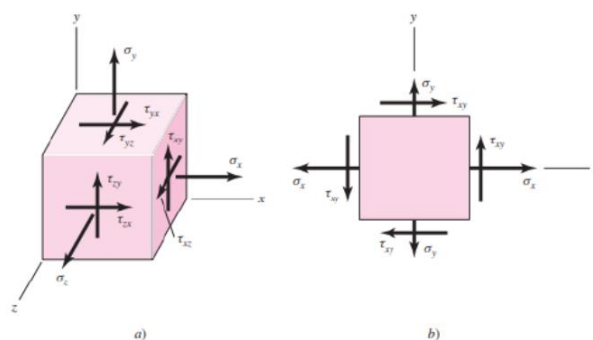
## 5.6. Esfuerzo

Se define como la intensidad de la fuerza aplicada de forma distribuida sobre el área de una superficie.

Dependiendo de la orientación de la fuerza, se distinguen dos categorías principales:

- **Esfuerzo normal (o axial):** Es cuando una fuerza actúa perpendicularmente a la superficie.
- **Esfuerzo cortante tangencial:** Ocurre cuando la dirección de la fuerza es tangencial a la superficie [19].

*Ilustración 5: a) Esfuerzo Normal – b) Esfuerzo Cortante*



*Fuente: Departamento de metal-mecánica*

5.7. Matemáticamente el esfuerzo normal se expresa:

$$\sigma = \frac{FN}{A}$$

$$\tau = \frac{FT}{A}$$

DONDE:

- FN es fuerza normal
- A es el área de la superficie analizada
- $\sigma$  es el esfuerzo normal
- FT es la fuerza tangencial
- $\tau$  es el esfuerzo cortante

5.8. Esfuerzo máximo Von Mises

Un material falla cuando la energía de distorsión llega a un nivel crítico, equivalente a la energía de distorsión que se produce cuando el material experimenta deformación plástica [20].

La condición de fallo se expresa matemáticamente en la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{Máximo V.M.}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

DONDE:

- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  son esfuerzos principales en tres direcciones perpendiculares.
- $\sigma_{\text{Máximo V.M.}}$  es el esfuerzo de Von Mises.

5.9. Factor de Seguridad

El factor de seguridad se utiliza para determinar en qué punto una estructura o componente dejará de ser capaz de soportar la carga de diseño, es decir, cuando se alcanza el límite de resistencia y ya no puede asumir cargas adicionales. En casos donde el fallo puede ocasionar

daños graves, como pérdidas humanas o lesiones, se exige un factor de seguridad mayor, ya sea por criterios de diseño o por normativas [21].

A continuación, se presenta una tabla que relaciona el factor de seguridad recomendado según el tipo de pieza o equipo [22].

*Tabla 7: Factor de seguridad según equipo*

Equipo	Factor de seguridad
Componentes de aeronaves	1,5 - 25
Calderas	3,5 - 6
Pernos	8,5
Ruedas de hierro fundido	20
Componentes del motor	6 - 8
Eje de alta resistencia	10 - 12
Equipos de elevación - ganchos	8 - 9
Recipientes a presión	3,5 - 6

*Fuente: Engineering ToolBox.*

Para determinar el F.S se expresa mediante la siguiente formula:

$$F.S = \frac{\text{Limite Elastico}}{\sigma_{\text{Máximo V.M.}}}$$

#### 5.10. Fatiga.

La fatiga se manifiesta como fallas graduales en una pieza sometida a cargas que pueden ser fluctuantes, repentinas y cíclicas. Este fenómeno ocurre cuando una estructura puede fallar bajo un esfuerzo menor al requerido en condiciones estáticas, resultando en una falla.

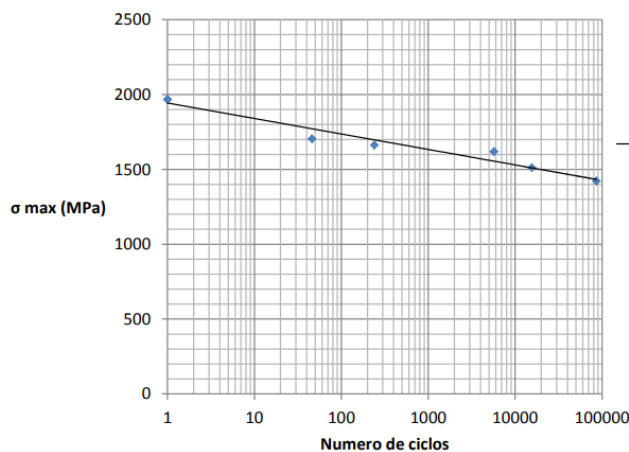
Se presenta 3 fases en el cual se presenta falla por fatiga:

- **Iniciación:** Es el punto de partida de la falla, donde pueden aparecer una o varias grietas en la pieza. Estas grietas suelen originarse principalmente en áreas con concentración de tensiones, aunque también pueden surgir en cualquier otra parte de la pieza.
- **Propagación:** Durante esta fase, las grietas se desarrollan debido a la presencia de cargas aplicadas. Debido a su delgadez, estas grietas son difíciles de detectar.
- **Rotura:** Como consecuencia de la propagación de las grietas, la pieza experimenta un deterioro progresivo que eventualmente puede llevar a una rotura debido a fatiga [21].

### 5.11. Diagrama S-N (Esfuerzo - Vida)

Las curvas S-N del epoxy/ fibra de carbono se ha referenciado de la ilustración 6, donde posea valores experimentales de  $\sigma_{max}$  en el eje vertical y los valores de ciclos en el eje horizontal, utilizando una escala logarítmica [23].

*Ilustración 6: Diagrama S-N - CFRP*

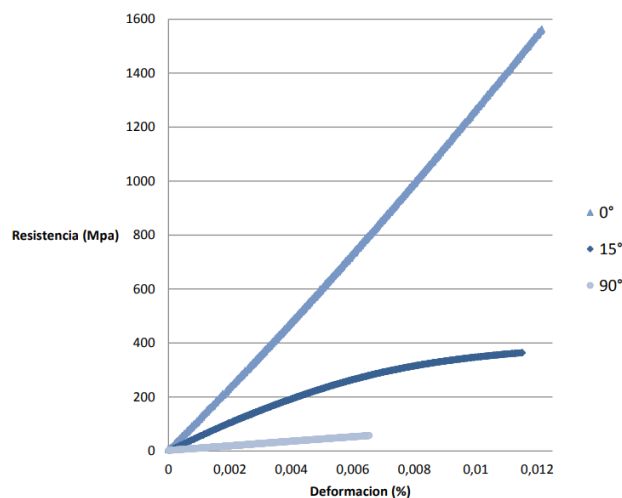


*Fuente: Universidad de Sevilla*

### 5.12. Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ (Esfuerzo – Deformación)

La ilustración del esfuerzo – deformación muestra una pendiente pronunciada en compuesto de fibra de carbono a  $0^\circ$  el cual se toma como referencia [23].

*Ilustración 7: Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  - CFRP*



*Fuente: Universidad de Sevilla*

## **Materiales y métodos**

### 6. Metodología.

#### 6.1. Tipo de investigación

La presente investigación presenta naturaleza aplicada-correlacional. Utilizando matriz de comparación para los resultados, con el objetivo de aumentar la vida útil del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales compuestos CFRP.

#### 6.2. Tipo de proyecto

La presente tesis tiene como finalidad diseñar el terminal de dirección del tractor agrícola con materiales CFRP para aumentar su vida útil, para esto, se emplea diversos programas para el análisis de material y el diseño.

#### 6.3. Técnicas e instrumentos

Se realiza revisiones bibliográficas de fichas técnicas de tractores, también, mediante matrices de necesidades se seleccionó el material CFRP, luego, se diseñó mediante la metodología alemana VDI 2222, además, se realizó matrices de comparación para la comparación porcentual de los resultados, y por último se realizó una estructura de costos estándar para el diseño del nuevo terminal de dirección.

#### 6.4. Población y Muestra

##### 6.4.1. Población

La población son todos los tractores agrícolas encontrados en la región de Piura, para ello se revisó antecedentes en los cuales se referencia la cantidad de tractores que se encuentran en el parque automotor de la región.

##### 6.4.2. Muestra

La muestra serían la cantidad de terminales de dirección, siendo dos terminales de dirección por tractor agrícola.

### 6.4.3. Variables y operacionalización

#### a) Definición Conceptual

**Variable independiente:** Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola.

El diseño mecánico implica utilizar principios de ingeniería mecánica para determinar las dimensiones y configuración de productos antes de su fabricación [24].

**Variable dependiente:** Vida útil

La vida útil se describe como el lapso durante el cual una pieza mecánica se deteriora hasta experimentar un fallo catastrófico, o también como el tiempo requerido para alcanzar el límite de fluencias aceptable [25].

#### b) Definición Operacional

**Variable independiente:** Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola.

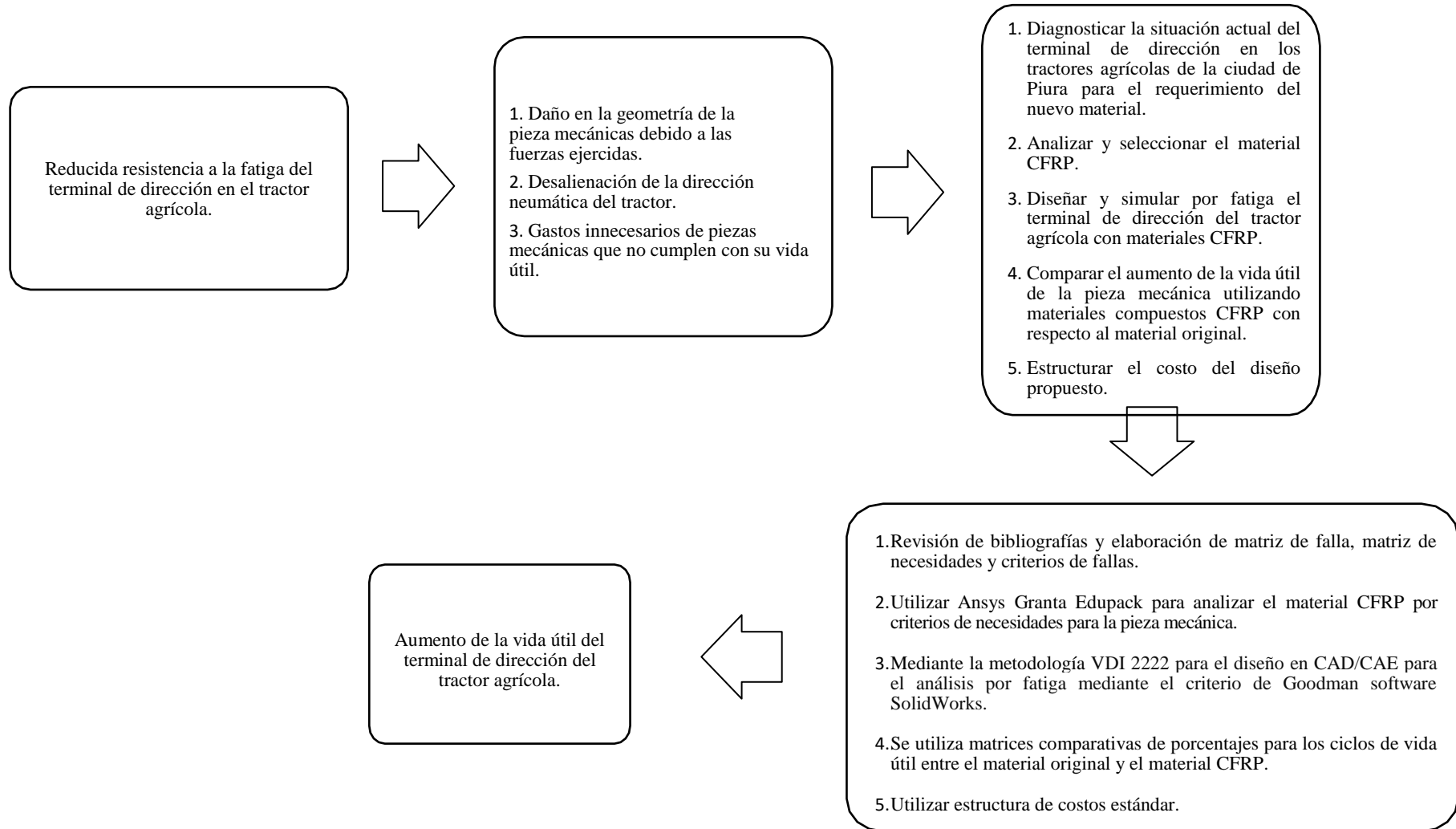
El diseño del terminal de dirección hace referencias al proceso de medir criterios para un nuevo diseño que cumpla con el propósito de aumentar su vida útil.

**Variable dependiente:** Vida útil

La vida útil implica obtener un mayor número de ciclos de trabajo para el terminal de dirección.

## 6.5. Diagrama de flujo

*Esquema 1: Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP para aumentar la vida útil.*



*Fuente: Propia*

## 6.6. Hipótesis

Diseño del terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP para aumentar la vida útil.

*Tabla 8: Formulación de Hipótesis.*

<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>
Diseñar el terminal de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP para aumentar su vida útil.	Si se diseña el terminal de dirección utilizando materiales compuestos, entonces, se logrará aumentar la vida útil.
<b>OBJETIVO ESPECIFICO</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECIFICAS</b>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diagnosticar la situación actual del terminal de dirección en los tractores agrícolas de la ciudad de Piura para el requerimiento del nuevo material.</li> <li>2. Analizar y seleccionar el material CFRP.</li> <li>3. Diseñar y simular por fatiga el terminal de dirección del tractor agrícola con materiales compuestos CFRP.</li> <li>4. Comparar el aumento de la vida útil de la pieza mecánica utilizando materiales compuestos CFRP con respecto al material original.</li> <li>5. Estructurar el costo del diseño propuesto.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si se diagnostica y se reconoce las fallas del terminal de dirección, entonces se determinará el requerimiento de las propiedades del nuevo material.</li> <li>2. Si se analiza el material mediante el software, se podrá elegir el material CFRP que se adecue a las necesidades de la pieza.</li> <li>3. Si se diseña mediante metodología y se simula por fatiga con materiales compuestos entonces se aumentará la vida útil.</li> <li>4. Si se compara los resultados de vida útil del material compuesto con el de referencia, se determina que el material compuesto aumentó la vida útil de la pieza.</li> <li>5. Al estructurar el costo del diseño con material CFRP, se tendrá en cuenta como opción innovadora para el mercado a precio competitivo.</li> </ol>

*Fuente: Propia.*

## 6.7. Operación de variables

Tabla 9: Operación de variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	ITEMS
VARIABLE INDEPENDIENTE	El Terminal de dirección, conocido también como Brazo de Dirección, tiene la función de transferir los esfuerzos y movimientos desde el sistema de dirección hasta las ruedas del vehículo. Cuando el conductor gira el volante, este movimiento se transfiere a través de una marcha que activa el Terminal de dirección, permitiendo que la dirección oriente las ruedas de acuerdo con las indicaciones del conductor [24].	Se medirá a través del análisis estático estructural y por análisis de fatiga utilizando el criterio de Goodman el diseño propuesto.	Análisis estático estructural	Esfuerzo	Pa
DISEÑO DEL TERMINAL DE DIRECCIÓN DEL TRACTOR AGRICOLA				Desplazamiento	mm
				Deformación unitaria	Adimensional
				Factor de seguridad	Adimensional
			Análisis de Fatiga	Vida Útil	Ciclos
				Daño	Adimensional

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	ITEMS
VARIABLE DEPENDIENTE					
Aumentar la vida útil del Terminal de dirección	El dimensionamiento de la vida útil se define como la duración o cantidad de ciclos de operación en los que se espera que un objeto, equipo o sistema pueda funcionar correctamente, midiendo también el rendimiento como parámetro que nos indica el buen o mal funcionamiento de las piezas mecánicas [25].	Se medirá la variación de la vida útil de la pieza mecánica utilizando materiales CFRP en unidades porcentuales.	Aumento de la vida útil	Variación de vida útil	Porcentaje

*Fuente: Propia.*

Tabla 10: Tabla de indicadores.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
	GENERAL	GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN
¿El diseño del terminal de dirección utilizando materiales compuestos CFRP podrá aumentar la vida útil?	Incrementar la vida útil del terminal de dirección de dirección del tractor agrícola utilizando materiales CFRP.	Si se utiliza materiales compuestos CFRP en el diseño de la pieza mecánica, entonces, se logrará aumentar la vida útil.	Diseño y simulación del terminal de dirección	Tipo aplicada - correlacional con utilización del software ANSYS.
	ESPECIFICOS	ESPECIFICOS	INDICADORES	TECNICA: RECOLECCION DE DATOS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diagnosticar la situación actual del terminal de dirección en los tractores agrícolas de la ciudad de Piura para el requerimiento del nuevo material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si se diagnostica la situación actual del terminal de dirección, entonces, se tendrá que requerir nuevos materiales resistentes a la torsión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Esfuerzo</li> <li>Desplazamiento</li> <li>Deformación Unitaria</li> <li>Factor de seguridad</li> <li>Vida útil</li> <li>Daño</li> </ul>	En la presente tesis se recopilarán datos de fichas técnicas del terminal de dirección de los diferentes modelos y marcas de tractores agrícolas.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analizar y seleccionar el material compuesto entre los distintitos tipos de fibra de carbono en el software Ansys Granta Edupack.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si se analiza un material compuesto, se tendrá el material adecuado para el diseño.</li> </ul>	VARIABLE DEPENDIENTE	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar la simulación de fatiga del terminal de dirección del tractor agrícola con materiales compuestos CFRP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si se realiza un análisis de fatiga del diseño del terminal de dirección, entonces, se aumentará la vida útil el terminal de dirección.</li> </ul>	Aumento de la vida útil del terminal de dirección	POBLACIÓN Y MUESTRA
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Comparar el aumento de la vida útil de la pieza mecánica utilizando materiales compuestos CFRP tomando como referencia el material original.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si se compara los resultados obtenidos, se tendrá conclusiones de la investigación.</li> </ul>	INDICADORES	La unidad de estudio es el terminal de dirección de tractores agrícolas de la ciudad de Piura.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Estructurar el costo del diseño propuesto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si se estructura el costo del diseño propuesto, será una propuesta innovadora para el mercado.</li> </ul>	Variación de la vida útil		

Fuente: Propia.

## Resultados y discusión

7. Diagnosticar el estado actual del terminal de dirección en los tractores agrícolas de la ciudad de Piura para el requerimiento del nuevo material.

Mediante revisión bibliográfica y manuales de marcas conocidas en el mundo de los tractores agrícolas, se estima que no existe un mantenimiento para el terminal de dirección, más que el engrase periódico para ciertos diseños de terminales de dirección, sin embargo, se toma en cuenta que el terminal de dirección de los tractores agrícolas es de “una sola vida” y por lo general depende de su material de fabricación la duración de esta pieza.

### 7.1. Matriz de fallas del terminal de dirección

Se describe en el cuadro siguiente las casusas de falla y sus consecuencias de cada una de estas en las cuales el terminal de dirección tiende a fallar.

*Tabla 11: Matriz de falla*

Descripción	Falla
Fluencia de la junta	El movimiento de dirección es irregular o inconsistente.
Exceso de juego	Causa una dirección imprecisa.
Corrosión	Debilita su estructura.
Geometría irregular	Volante de dirección endurecido
Ruptura de junta	Falla total y pérdida de control de dirección.

*Fuente: Propia*

A continuación, se evalúa criterios en base a la descripción de fallas, en donde se manifiesta que “1” hace referencia a la dependencia del criterio para reducir el fallo y “0” hace referencia a que no afecta o no influye en el fallo de la pieza.

*Tabla 12: Criterios de Selección*

Descripción	Criterios de Selección		
	Resistencia a la fluencia	resistencia a la torsión	resistencia a la corrosión
Fluencia de la junta	1	1	0
Exceso de juego	1	1	0
Corrosión	0	0	1
Geometría irregular	1	0	0
Ruptura de junta	1	1	1
Total	4	3	2

*Fuente: Propia*

Para la posterior selección de componentes se debe tomar en cuenta los dos criterios con mayor puntaje, con lo cual se trabaja para la selección de materiales, en donde escoger materiales con mayor resistencia a la torsión y durabilidad serán primordial para la comparación y selección.

## 7.2. Matriz de necesidades – métricas

Se establece las necesidades del terminal de dirección con sus respectivas importancias, en una escala de 1-5, siendo 1 = baja importancia, y 5 = muy importante.

*Tabla 13: Matriz de Necesidades*

IMPORTANCIA	NECESIDAD
4	Reducir vibraciones
3	Permitir ajuste de posición
5	Articular junta
3	Precio accesible
5	Resistente a fluencias

*Fuente: Propia*

En la siguiente tabla se manifiesta las unidades de las necesidades que se deben tomar en consideración para el aumento de la vida útil.

*Tabla 14: Matriz de importancia*

Valor	Importancia	Unidad
Vida útil	5	Ciclos
Tensiones	5	N/m <sup>2</sup>
Deformación unitaria	5	m
Desplazamientos	5	m
Factor de seguridad	5	Und.
Coste de fabricación	3	Soles
Facilidad de ajuste de junta	2	-

*Fuente: Propia*

De esta manera, se define el rango de valores en el que cada métrica debe ubicarse, con el fin de contrastar con los valores obtenidos posteriormente en el estudio del componente mecánico.

*Tabla 15: Matriz de unidades.*

Valor	Unidad	valor
Vida útil	Ciclos	100 000
Tensiones	N/m <sup>2</sup>	-
Deformación unitaria	m	-
Desplazamientos	m	-
Factor de seguridad	Und	5
Coste de fabricación	soles	297
Facilidad de ajuste de junta	-	Sí

*Fuente: Propia*

A partir de estas necesidades y métricas se realiza la tabla en donde se aprecia que métricas corresponden a las necesidades.

*Tabla 16: Métricas*

NECESIDAD	Métricas						
	Vida útil	Tensiones	Deformaciones unitarias	Desplazamientos	Factor de seguridad	Coste de fabricación	Facilidad de ajuste de junta
Reducir vibraciones al volante				x			
Permitir ajuste de posición							x
Articular junta		x					
Precio accesible						x	
Resistente a fluencias	x	x	x		x		

*Fuente: Propia*

### 7.3. Parque de tractores agrícolas en la ciudad de Piura.

Los tractores agrícolas en la ciudad de Piura están clasificados de en 3 perfiles de propietarios: empresas agroindustriales, arrendadores y distribuidores autorizados. De ellos se estima que existe 621 unidades de máquinas agrícolas en la ciudad de Piura como se muestra en la tabla.

*Tabla 17: Parque de tractores Agrícolas en la ciudad de Piura.*

Empresas Agroindustriales	291 und.
Distribuidores autorizados	114 und.
Arrendadores	215 und.
TOTAL	621 und.

*Fuente: Escuela de Dirección Universidad de Piura.*

Identificación de terminales de dirección de tractores en la ciudad de Piura.

*Tabla 18: Cantidad de Terminales de dirección*

Ítem	Cantidad
Tractores agrícolas	621 Und.
Terminal de dirección por tractor	2 Und.
TOTAL	1242 Und.

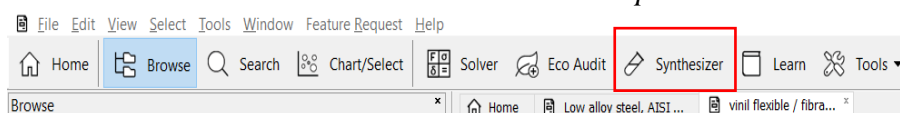
*Fuente: Propia*

8. Seleccionar el material compuesto entre los distintitos tipos de fibra de carbono en el software CES EDUPACK

Para la selección del nuevo material se tiene en cuenta en los parámetros de la tabla 11 en donde la resistencia de torsión y la durabilidad debe primar en el nuevo diseño; para esto se utilizará el software ANSYS GRANTA EDUPACK en donde se seleccionará conjuraciones con 3 matrices poliméricas (Epoxy, Poliéster, Vinil flexible) y 3 tipos de fibras de carbono (modulo alto, modulo muy alto, modulo ultra alto). Para el análisis se tendrá en cuenta los compuestos que poseen el 50,1 % y 75 % de fibra de carbono.

El primer paso para el uso del software se utilizará la herramienta “Synthesizer”

*Ilustración 8: Herramientas Granta Edupack*

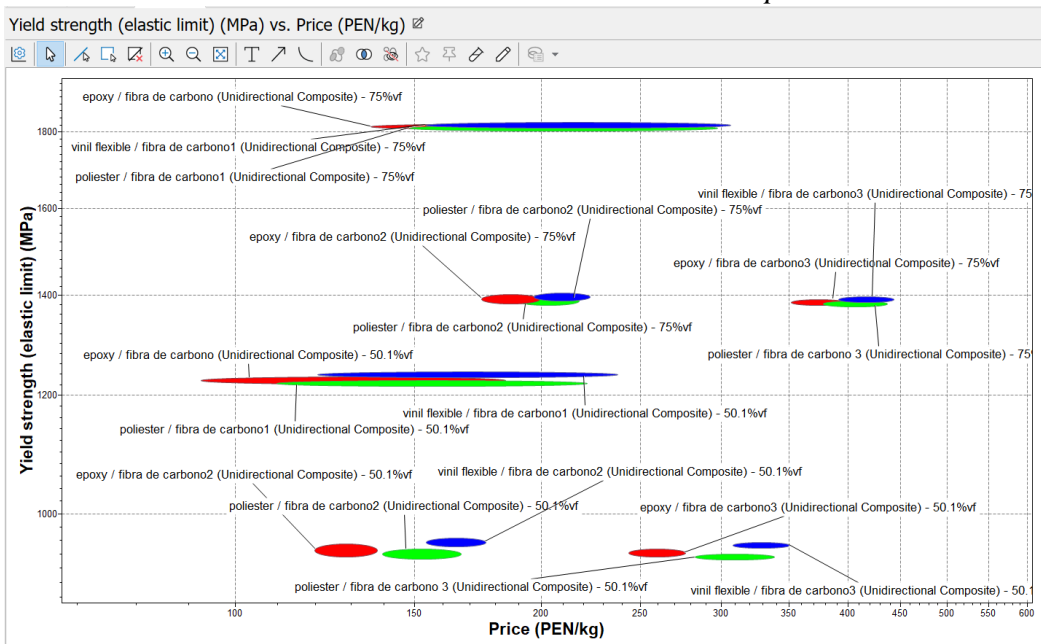


*Fuente: Propia*

En donde se seleccionará la opción de “continuous fiber” para la posterior selección de matriz, tipo de fibra y porcentaje de volumen de fibra.

En la Ilustración N° 9 se observa la resistencia a la fluencia vs PEN/m<sup>3</sup>, en donde se encuentran de color rojo el material de matriz de epoxy, de color verde los materiales de matriz de poliéster y de color azul los materiales de matriz de vinil flexible.

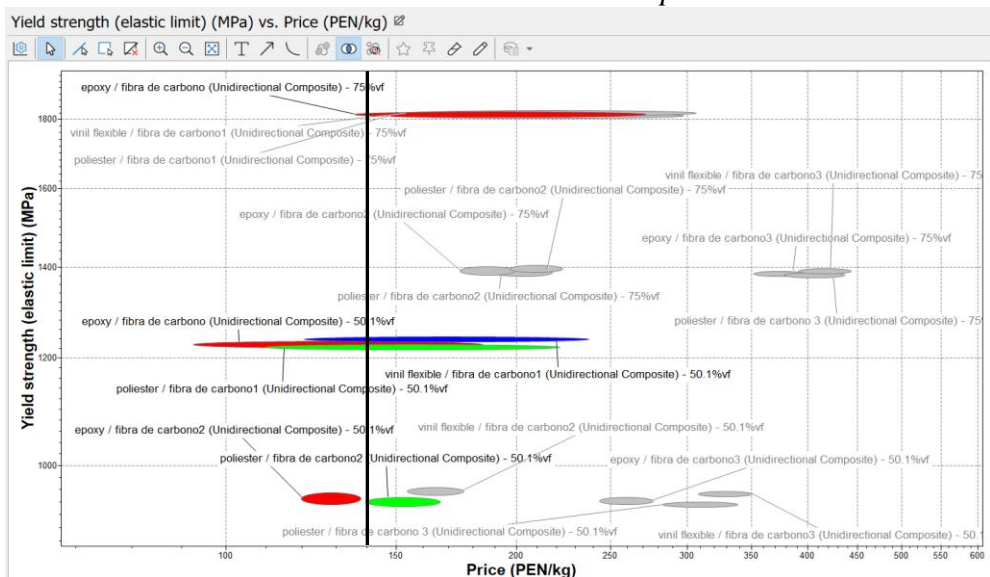
*Ilustración 9: Materiales CFRP - Limite elástico vs precio*



*Fuente: Propia*

El primer paso para el análisis del material se basa en establecer el precio máximo, para poder sostener la viabilidad de fabricación de la pieza mecánica. Esto se evidencia en la siguiente ilustración.

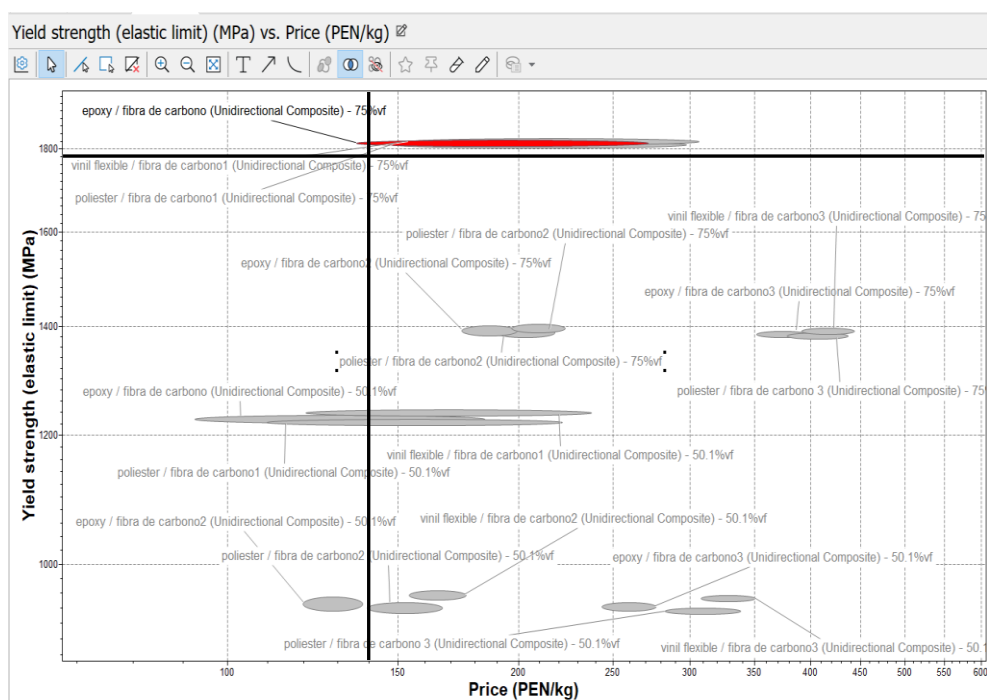
*Ilustración 10: Parámetro Precio Edupack*



*Fuente: Propia*

En la ilustración 8 se observa que se descartó 12 de los 18 materiales compuestos en estudio que se tenían en cuenta inicialmente, debido al límite del precio máximo de 140 soles/Kg. El siguiente paso del análisis se basa en establecer el límite a la fluencia superior a los 1500 Mpa.

*Ilustración 11: Material seleccionado*



*Fuente: Propia*

En la gráfica anterior se observa el descarte total de 17 materiales compuestos, esto debido al descarte de 12 materiales compuestos por precio límite y 5 materiales compuestos por resistencia a la fluencia.

Finalmente se estableció el material seleccionado que se estudiarán en la pieza mecánica, la cual es el de matriz de epoxy con fibra de carbono con 75% de composición unidireccional.

9. Diseñar y simular por fatiga el terminal de dirección del tractor agrícola con materiales compuestos CFRP.

9.1. Fases del proceso del diseño.

Para el diseño del terminal de dirección se sirve del método Verein Deutscher Ingenieure (VDI 2222), En donde comprende las fases de: Comprensión de la solicitud, Concepción de la solución y elaboración del proyecto.

## 9.2. Comprensión de la solicitud.

Para esta fase se elaborará una lista de exigencias que debe contemplar el diseño.

### 9.2.1. Lista de Exigencias.

*Tabla 19: Lista de exigencias.*

<b>DESEOS (D) EXIGENCIAS (E)</b>	<b>Lista de exigencias</b>
	<b>FUNCION PRINCIPAL</b>
E	-Articular la barra de dirección con el cubo de la rueda.
	<b>MANTENIMIENTO</b>
E	-Se podrá reparar y dar mantenimiento.
	<b>GEOMETRIA</b>
E	-Deberá ser contenido en dimensiones de la base del terminal de dirección de 180 mm de largo donde se conectará a la barra de dirección.
	<b>ENSAMBLAJE</b>
E	-Se realizará el ensamblaje y desmontaje con herramientas sencillas.
	<b>USO</b>
E	-Dar movilidad articulada a mecanismo.
	<b>ENERGÍA</b>
E	-Será proporcionada por el mecanismo de dirección
	<b>COSTO</b>
D	- Se debe tener un costo competitivo al de la pieza original.

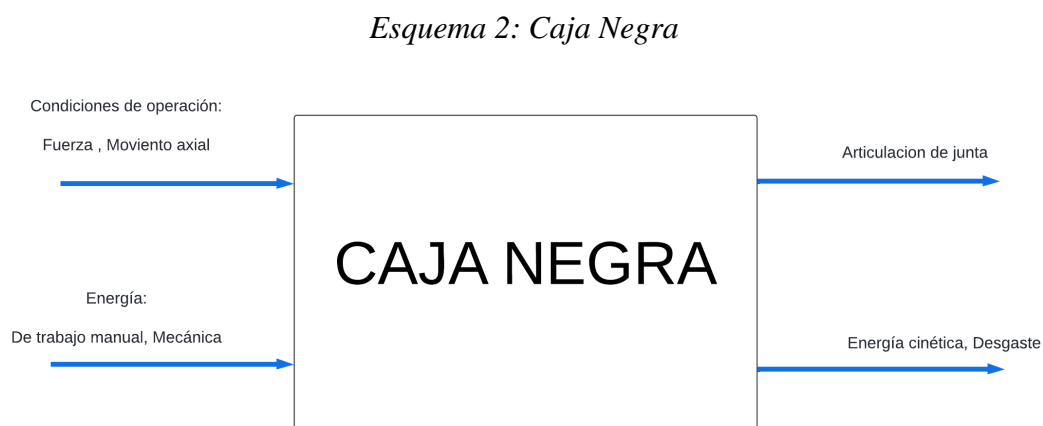
*Fuente: Propia*

### 9.2.2. Concepción de la solución.

Para esta fase se elaborará estructura de funciones en la cual se realizará una caja negra que se encarga de reconocer los procesos técnicos para realizar la estructura de funciones general.

#### a. Caja negra

La ilustración muestra la simplificación de funciones mediante una caja negra, en donde los valores de fuerza y movimiento axial son los valores por utilizar para que se de la articulación de la junta del terminal de dirección.



*Fuente: Propia*

#### b. Procesos Técnicos.

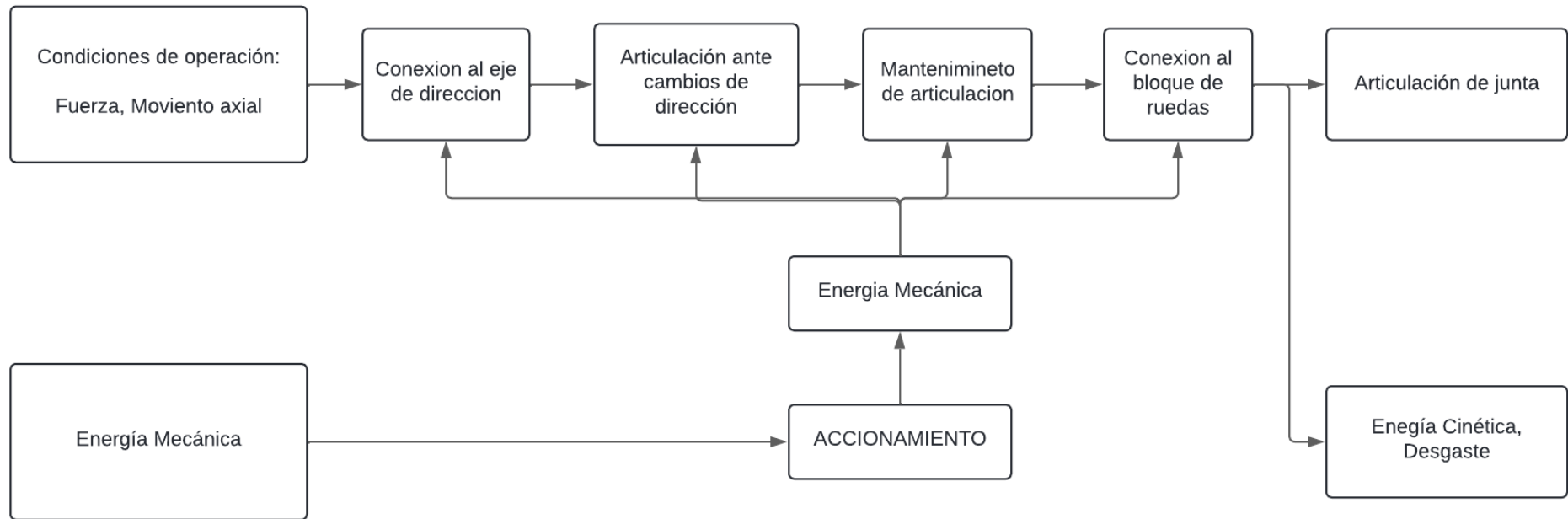
Se reconoció 4 procesos básicos:

- Conexión al eje de dirección
- Mover axialmente la barra de dirección.
- Flexibilidad de dirección y cargas.
- Conexión al bloque de ruedas.

#### c. Estructura de funciones.

Mediante los procesos técnicos se elabora la estructura de funciones que se debe considerar para la articulación de la junta del terminal de dirección.

*Esquema 3: Estructura de Funciones*










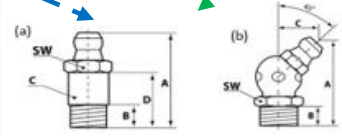

*Fuente: Propia*

9.3. Elaboración del proyecto

Para esta fase se desarrolla mediante la matriz de Zwicky y posteriormente mediante una matriz ponderada se seleccionará el diseño ideal que será justificado.




a. Matriz de Zwicky

Esquema 4: Matriz de Zwicky

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Conexión a eje de dirección	 Acoplamiento roscado	 Acoplamiento ranurado	 Acoplamiento brida
Articulación ante cambios de dirección	 Rodamientos	 Rodas esféricas	 Cruceñas
Mantenimiento de articulación	 Cojinetes desechables	 Puntos de engrase	
Conexión al bloque de ruedas	 Eje roscado por fuera		

Fuente: Propia

Tabla 20: Leyenda de Matriz de Zwicky

LEYENDA	
Solución 1	
Solución 2	
Solución 3	

Fuente: Propia

b. Matriz de Ponderada

En la matriz de Zwicky se identificaron 3 diseños conceptuales para la matriz ponderada en donde se considero los factores de Funcionalidad, Mantenimiento, Accionamiento, Fabricación.

*Tabla 21: Matriz Ponderada*

FACTORES	DISEÑO CONCEPTUAL			
	Peso	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Funcionalidad	4	3	4	2
Mantenimiento	5	3	4	3
Accionamiento	2	2	3	2
Fabricación	3	4	3	3
TOTAL		43	51	36

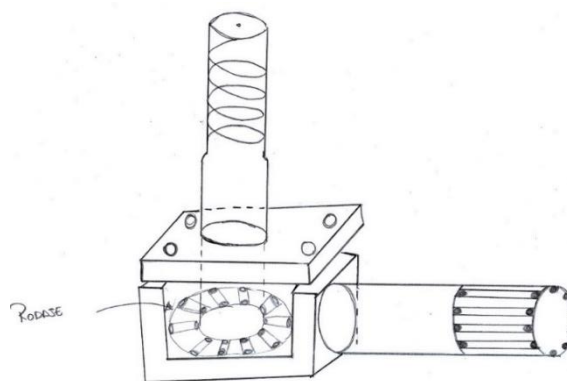
*Fuente: Propia*

Se evaluará los diseños teniendo en cuenta los criterios escogidos anteriormente. Con un puntaje de 0 a 5 siendo 0 = No Aceptable, 1= Suficiente, 2= Aceptable, 3 = Bueno, 4= Muy bueno, 5 = Ideal. Donde se multiplicará por el peso asignado.

c. Bosquejos de diseños.

Concepto de solución 1:

*Ilustración 12: Bosquejo de diseño 1.*

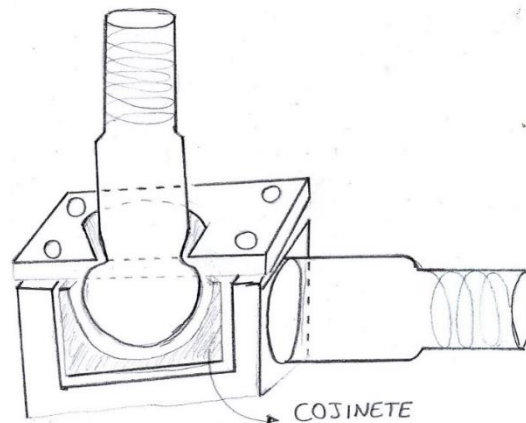


*Fuente: Propia*

El bosquejo del diseño 1 presenta la conexión del eje del terminal de dirección hacia el eje de la dirección de forma ranurada encargado de transmitir la fuerza axial del mecanismo de dirección, el rodaje se encarga de permitir la torsión del sistema que se ejerce por los cambios de dirección, los puntos de engrase es la parte por donde se le inyectará la lubricación al rodaje, y por último el eje rosca encargado del ensamble entre el terminal de dirección y la mangueta de la rueda del tractor.

Concepto de solución 2:

*Ilustración 13: Bosquejo de diseño 2.*

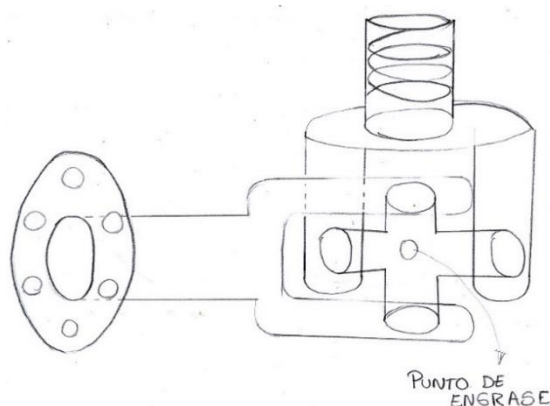


*Fuente: Propia*

El bosquejo del diseño 2 presenta la conexión del eje del terminal de dirección hacia el eje de la dirección con acoplamiento roscado, para el ajuste de longitud, encargado de transmitir la fuerza axial del mecanismo de dirección, la conexión entre la base y el muñón de forma redonda presenta un cojinete, encargado de resistir las diferentes cargas axiales, radiales y torsión ejercidas por la articulación del terminal de dirección, y por último el eje rosca encargado del ensamble entre el terminal de dirección y la mangueta de la rueda del tractor.

Concepto de solución 3:

*Ilustración 14: Bosquejo de diseño 3.*



*Fuente: Propia*

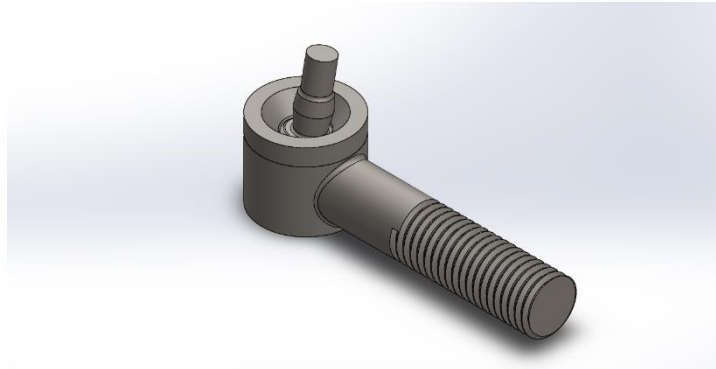
El bosquejo del diseño 3 presenta la conexión del eje del terminal de dirección hacia el eje de la dirección con acoplamiento de brida, la conexión entre la base y el muñón presenta una cruceta, encargado de articular el terminal de dirección, y por último el eje rosca encargado del ensamble entre el terminal de dirección y la mangueta de la rueda del tractor.

d. Propuesta seleccionada y justificada

Tras haber aplicado la matriz de Zwicky se procedió a seleccionar por ponderado el diseño conceptual, resultando el diseño 2 con mayor puntaje ya que por su geometría adquiere una funcionalidad para las cargas axiales, radiales y de torsión; sumando a que, el cojinete desechable le brinda un mejor mantenimiento al diseño; además, la conexión de eje dirección - terminal de dirección - cubo de rueda brinda un mejor accionamiento al sistema de dirección; por último, la fabricación es accesible con la propiedad que son piezas que se moldea en cualquier factoría.

### 9.3.1. Geometría del diseño seleccionado

*Ilustración 15: Geometría del diseño.*



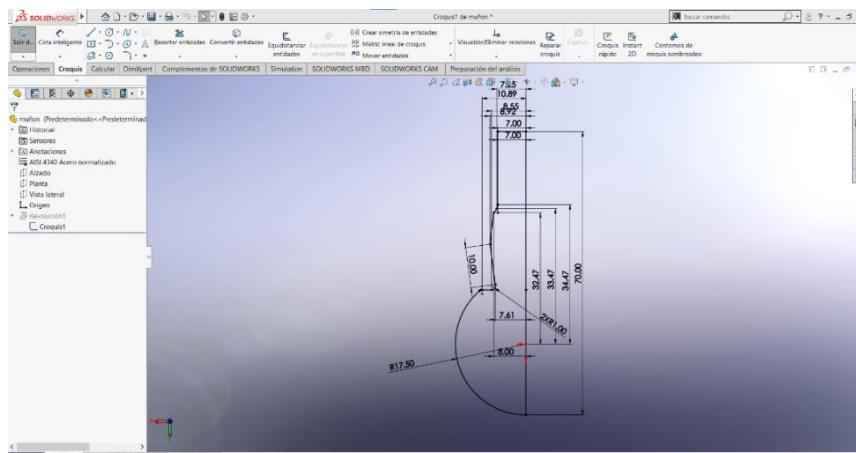
*Fuente: Propia*

#### a. Eje de rotula.

Para la geometría del eje muñón del terminal de dirección se toma de referencia el peso del vehículo de la tabla # en donde se determina que el diámetro de la bola de eje muñón será de 35 pulgadas con el cual se realizará las dimensiones de la pieza.

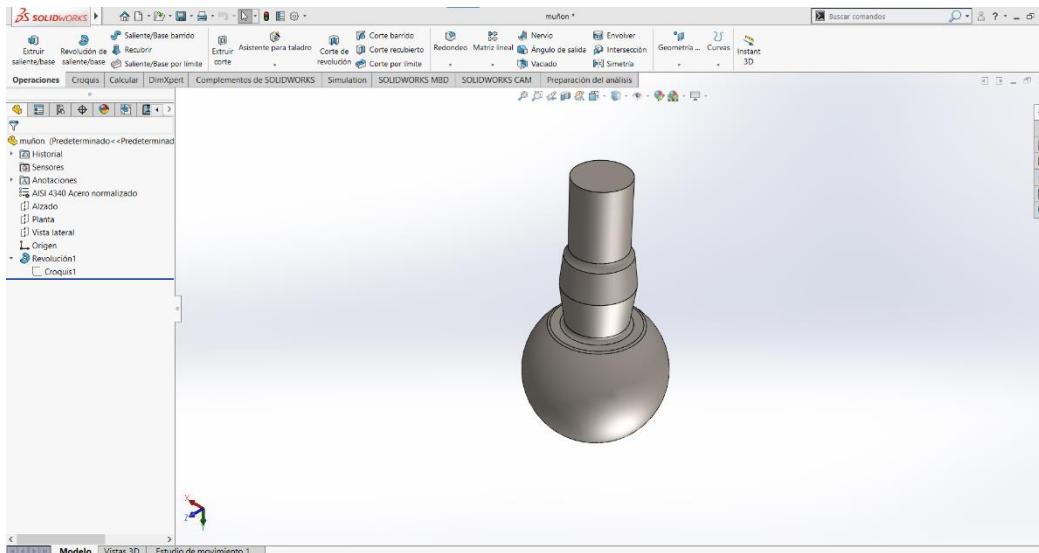
#### b. Dimensiones del eje de rotula.

*Ilustración 16: Dimensión del eje de rotula.*



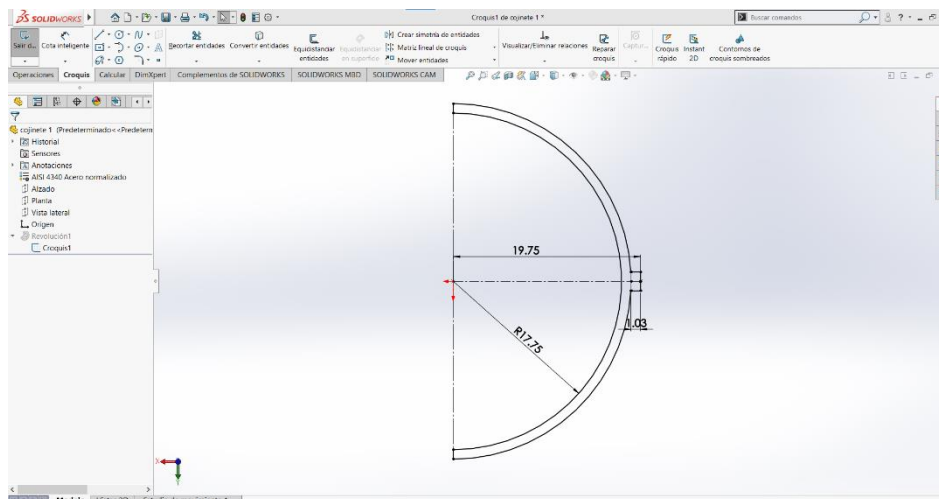
*Fuente: Propia*

## c. Diseño en CAD del eje de rotula.

*Ilustración 17: Diseño CAD del eje de rotula.**Fuente: Propia*

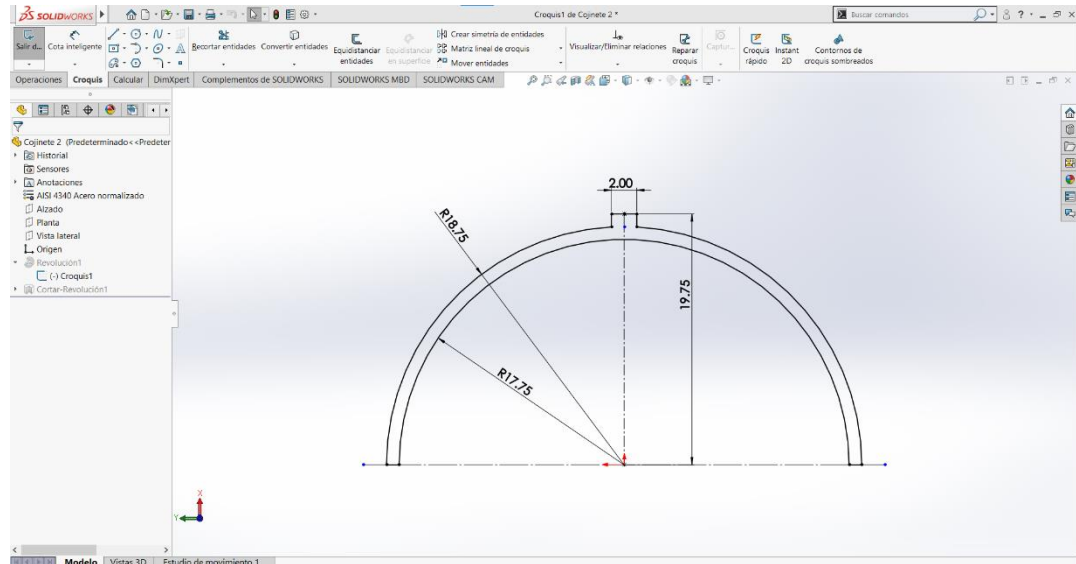
## d. Cojinete de rotula.

Dimensión del cojinete inferior.

*Ilustración 18: Dimensión del cojinete inferior.**Fuente: Propia*

Dimensión del cojinete superior.

*Ilustración 19: Dimensión del cojinete superior.*

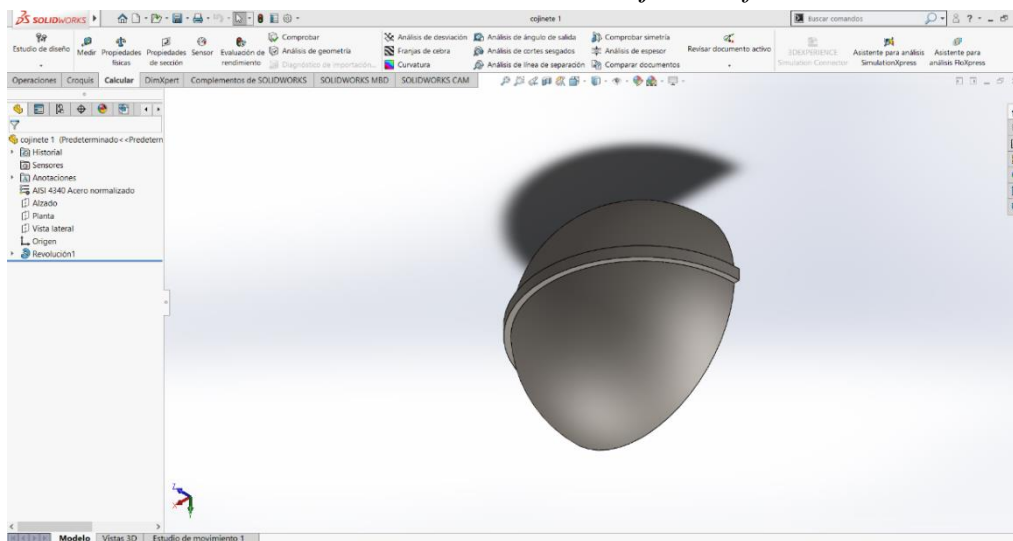


*Fuente: Propia*

e. Diseño en CAD del Cojinete de rotula.

Diseño en CAD del cojinete inferior.

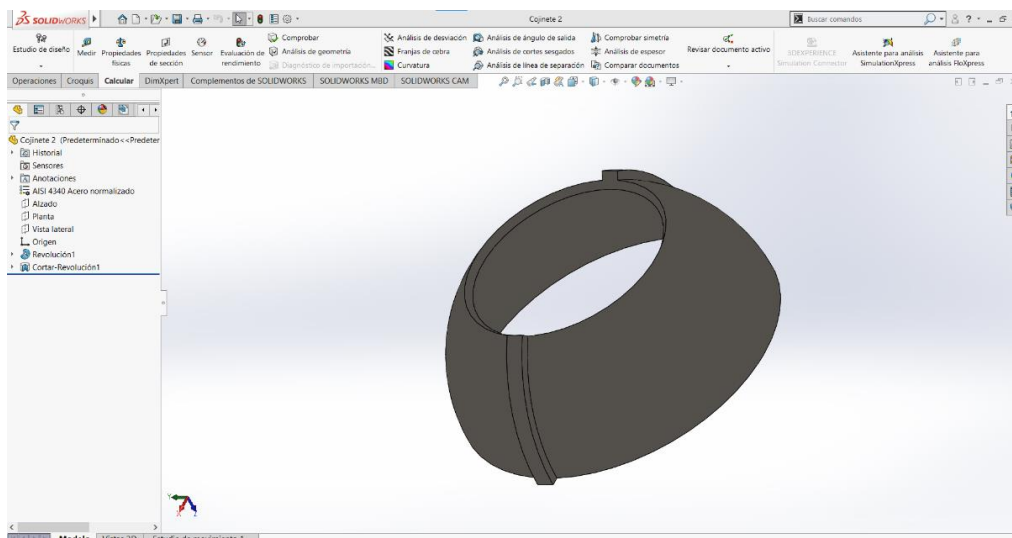
*Ilustración 20: Diseño en CAD cojinete inferior.*



*Fuente: Propia*

Diseño en CAD del cojinete superior.

*Ilustración 21: Diseño CAD del cojinete superior.*



*Fuente: Propia*

### 9.3.2. Diagrama de cuerpo libre

Se realiza el cálculo de las fuerzas axiales, Fuerzas Cortantes y Momento de flexión del cojinete en donde se utilizará el software Ftool's, para esto se utilizará:

*Tabla 22: Datos del diagrama de cuerpo libre.*

Esfuerzo aplicado (N)	18 000
Distancia (m)	0,0375
Distancia media (m)	0,01875

*Fuente: Propia*

#### a. Fuerzas axiales

*Ilustración 22: Fuerzas axiales en software Ftool's.*



*Fuente: Propia*

$$F = W * L$$

$$F = 18000 * 0,0375$$

$$F = 675 \text{ N/m}$$

$$\sum M_0 = 0$$

$$\sum M_A = -(F * 0,01875) + (R_B * 0,0375)$$

$$-(675 * 0,01875) + (R_B * 0,0375) = 0$$

$$R_B = 337,5 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum F_y = R_A - F + R_B$$

$$R_A - 675 + 375,5 = 0$$

$$R_A = 337,5 \text{ N}$$

Con esto se validó los resultados por el software para las fuerzas axiales en los puntos A y B.

b. Momento de flexión

*Ilustración 23: Momento de flexión en software Ftool's.*



*Fuente: Propia*

$$R_A x - Wx \left( \frac{x}{2} \right) - M(x) = 0$$

$$337,5x - 18000x \left( \frac{x}{2} \right) - M(x) = 0$$

$$M(x) = 337,5x - 9000x^2$$

$$x = 0$$

$$M(x) = 337,5(0) - 9000(0)^2$$

$$M(x) = 0$$

$$x = 0,01875$$

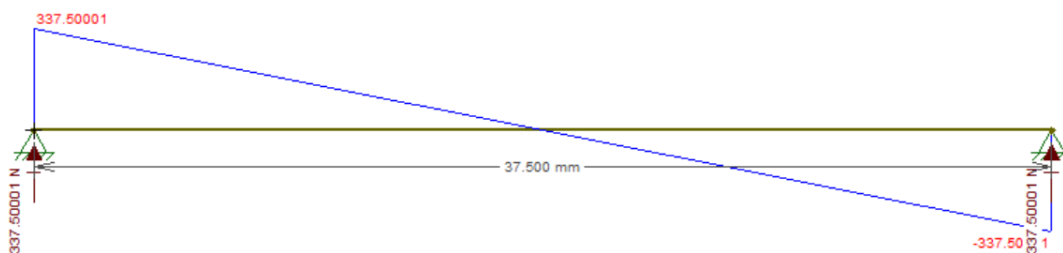
$$M(x) = 337,5(0,01875) - 9000(0,01875)^2$$

$$M(x) = 3,1639m = 0,003139mm$$

El momento de flexión dado por el Ftool se corrobora mediante fórmulas y datos recopilados.

c. Fuerzas cortantes

*Ilustración 24: Fuerzas cortantes en software Ftool's.*



*Fuente: Propia*

$$\frac{dM(x)}{dx} = 337,5 - 18000x = V(x)$$

$$x = 0$$

$$V(x) = 337,5 - 18000(0)$$

$$V(x) = 337,5$$

$$x = 0,01875$$

$$V(x) = 337,5 - 18000(0,01875)$$

$$V(x) = -337,5$$



Se corrobora las fuerzas cortantes en los puntos A y B.

### 9.3.3. Características para el análisis.

#### a. Descripción del material

Para el análisis y posterior comparación se toma como referencia el material original de fabricación, el acero AISI 4340, con las propiedades mecánicas:

*Tabla 23: Datos del diagrama de cuerpo libre.*

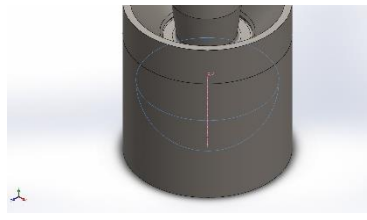
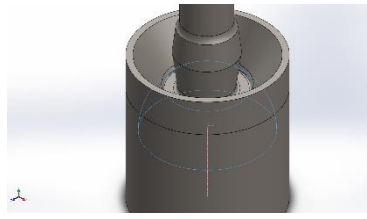
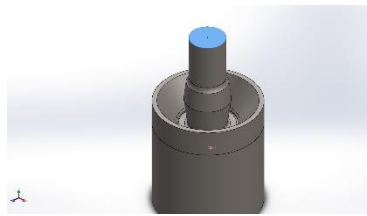
Referencia de modelo	Propiedades
	<p>Nombre: AISI 4340 Acero normalizado</p> <p>Límite elástico: <math>7,1e+08 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Límite de tracción: <math>1,11e+09 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Módulo elástico: <math>2,05e+11 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,32</p> <p>Densidad: <math>7850 \text{ kg/m}^3</math></p> <p>Módulo cortante: <math>8e+10 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: <math>1,23e-05 \text{ /Kelvin}</math></p>
	<p>Nombre: Epoxy/fibra de carbono 75% fv</p> <p>Límite elástico: <math>1,81e+09 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Límite de tracción: <math>1,39e+09 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Módulo elástico: <math>6,26e+11 \text{ N/m}^2</math></p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,394</p> <p>Densidad: <math>2110 \text{ kg/m}^3</math></p> <p>Módulo cortante: <math>7,7e+8 \text{ N/m}^2</math></p>

*Fuente: Propia*

#### b. Cargas aplicadas

Se toma como referencia las fuerzas máximas que se muestran en la tabla 4.

Tabla 24: Cargas aplicadas.

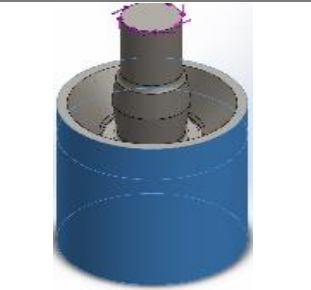
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	1 cara(s) Eje1 Aplicar fuerza 20000, ---, 18000 N
Fuerza-2		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	1 cara(s) Eje1 Aplicar fuerza 20000, ---, -18000 N
Torsión-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valor:	1 cara(s) Eje1 Aplicar momento torsor 7 N.m

*Fuente: Propia*

### c. Sujeciones

Se toma como sujeción la base de la articulación donde se simula que es el contacto entre el sistema de dirección.

Tabla 25: Sujeciones.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción	
Fijo-1		Entidades: Tipo:	2 cara(s) Geometría fija

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-3		<p><b>Entidades:</b> 1 cara(s)</p> <p><b>Tipo:</b> Geometría fija</p>

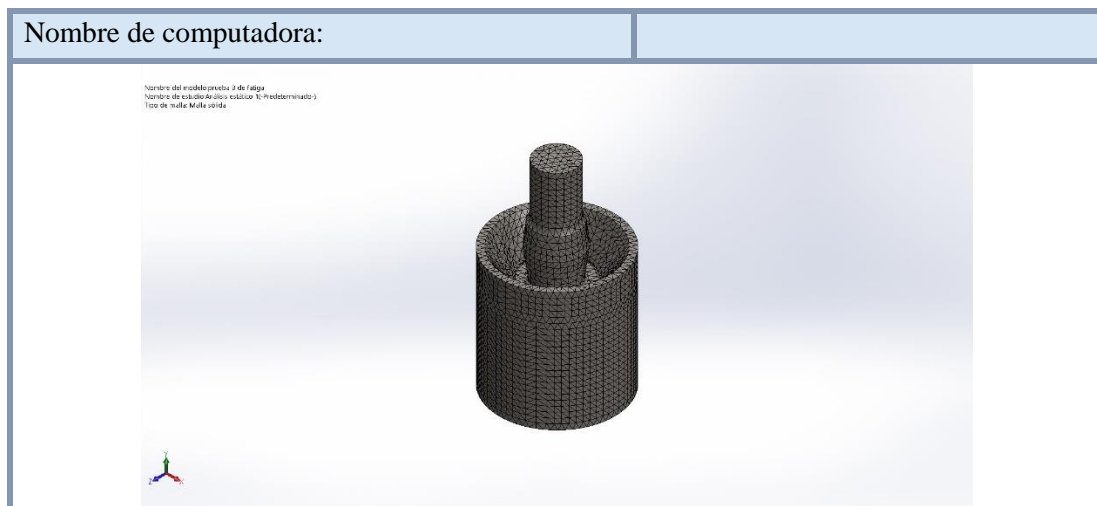
*Fuente: Propia*

#### d. Información de malla

El tipo de malla aplicado es una malla sólida el cual utiliza un mallado estándar. El porcentaje de elementos de coeficientes de aspecto menores 3 es de 99%, lo que indica que posee un mallado alto, como se expresa en la siguiente tabla:

*Tabla 26: Información de malla.*

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	1,98543 mm
Tolerancia	0,0992715 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Número total de nodos	93913
Número total de elementos	57607
Cociente máximo de aspecto	9,116
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	99
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:10



*Fuente: Propia*

e. Características del análisis de fatiga

Para el análisis de fatiga, se utiliza el criterio de Goodman y se toma el tipo de carga completamente invertida (LR= -1), con 100 000 ciclos.

*Tabla 27: Características del análisis de fatiga.*

Nombre del evento	N.º de ciclos	Tipo de carga	Asociación de estudios		
			Nombre de estudio	Factor de escala	Incremento
Suceso-1	100000	Completamente invertida (LR = -1)	Análisis estático	1	0
			1		

*Fuente: Propia*

*Ilustración 25: Características del análisis de fatiga.*

Opciones    Notificación    Comentario

Interacción de sucesos de amplitud constante

Interacción aleatoria  
 Sin interacción

Calcular tensiones alternas usando

Intensidad de tensión (P1-P3)  
 Tensión equivalente (von Mises)  
 Principal máx. absoluta (P1)

Cara de vaciado

Superior  
 Inferior

Corrección de la tensión media

Ninguno  
 Goodman  
 Gerber  
 Soderberg

Factor de reducción de resistencia a la fatiga (Kf)    1

Vida infinita    100000000000    ciclos

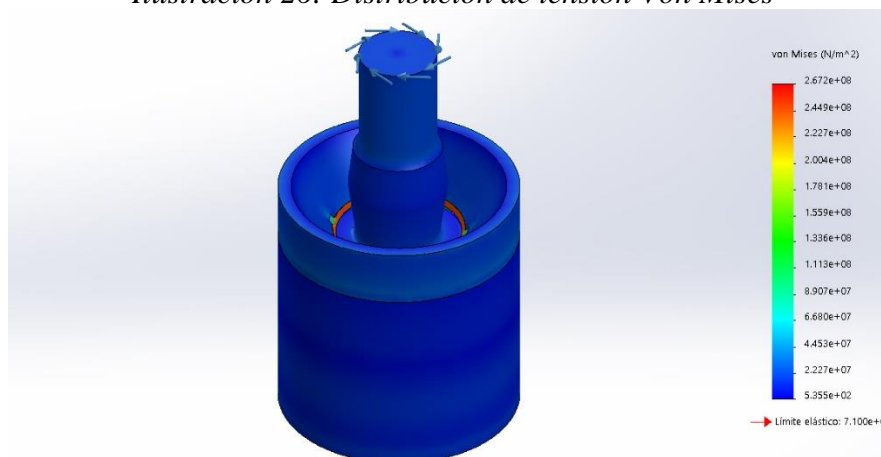
*Fuente: Propia*

**10.** Análisis de falla por fatiga del terminal de dirección con material AISI 4340 acero mediante el software Solidworks.

10.1. Distribución de tensiones.

El análisis ayuda a representar el comportamiento que tendrá las cargas y torque en el terminal de dirección e identificar la distribución de tensiones de Von Mises. Donde se muestra que existe la mayor tensión de  $2,672 \times 10^{+8}$  pa, en la parte de los cojinetes y la parte esférica del eje de la rótula.

*Ilustración 26: Distribución de tensión Von Mises*

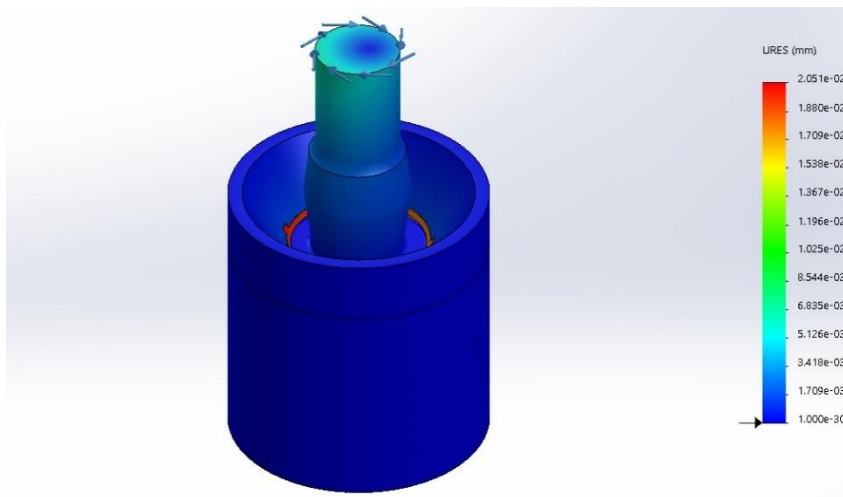


*Fuente: Propia*

## 10.2. Desplazamiento

Se logra observar que los elementos que sufren mayor desplazamiento son los cojinetes y el eje de la rótula, en donde el máximo desplazamiento es de 0,02051 mm.

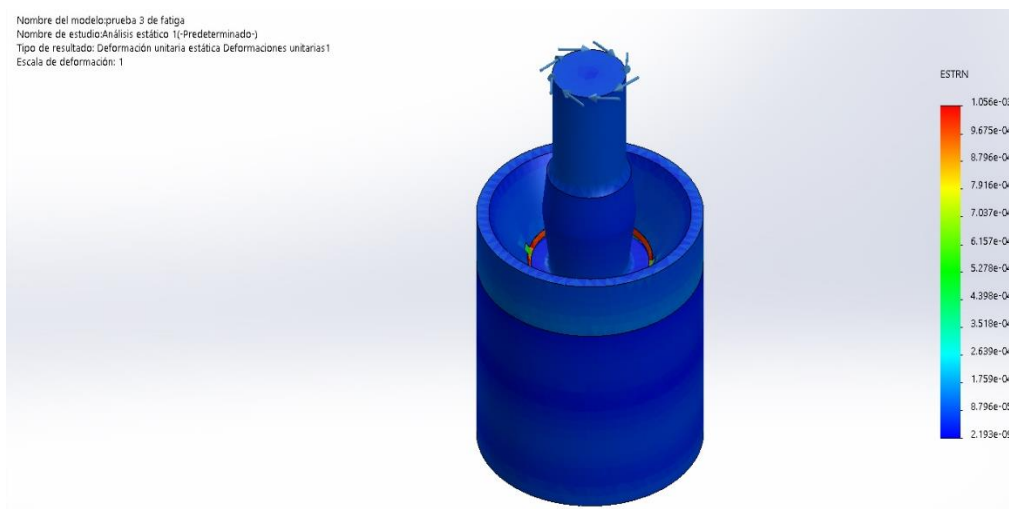
*Ilustración 27: Desplazamiento en software SolidWorks*



*Fuente: Propia*

## 10.3. Deformaciones unitarias

*Ilustración 28: Deformaciones Unitarias.*

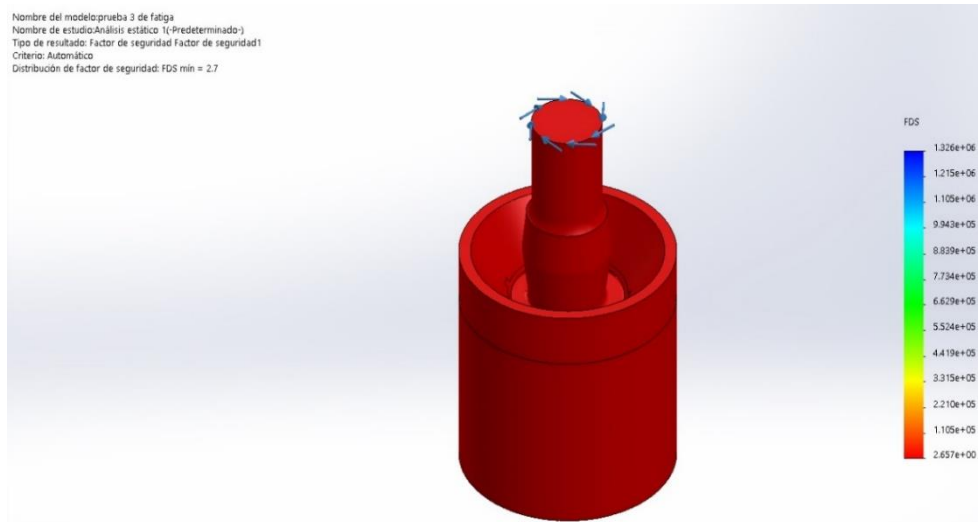


*Fuente: Propia*

#### 10.4. Factor de seguridad

El factor de seguridad es la correlación que existe entre la tensión de uso sobre la carga de falla, de esta manera el software ayuda a determinar la seguridad del diseño. Para el diseño propuesto existe un factor de seguridad mínimo de 2,7.

*Ilustración 29: Factor de seguridad.*

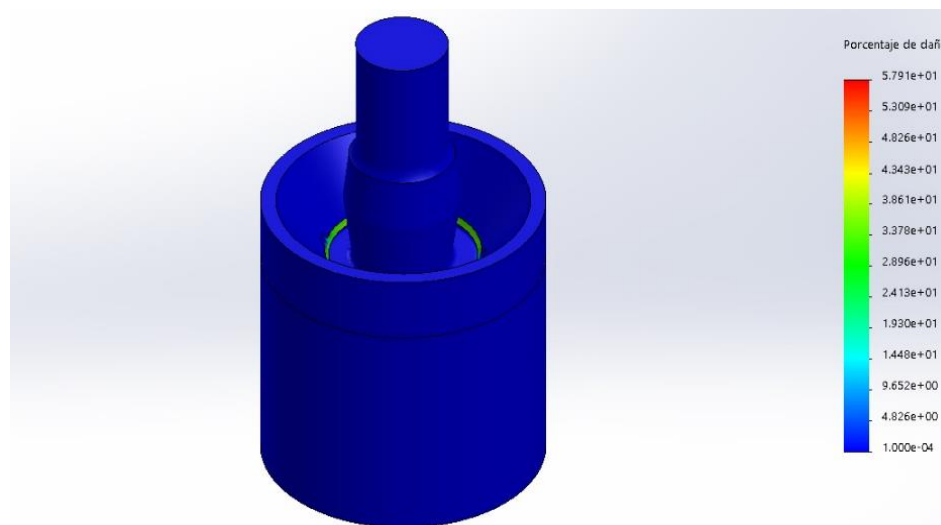


*Fuente: Propia*

#### 10.5. Daño acumulado

Se observa que el modelo tiene un daño acumulado del 57,91 %, en donde los cojinetes son las piezas en donde se enfoca el daño. Además un daño mínimo del 0,0004% en la parte de las bases y eje.

*Ilustración 30: Daño acumulado.*

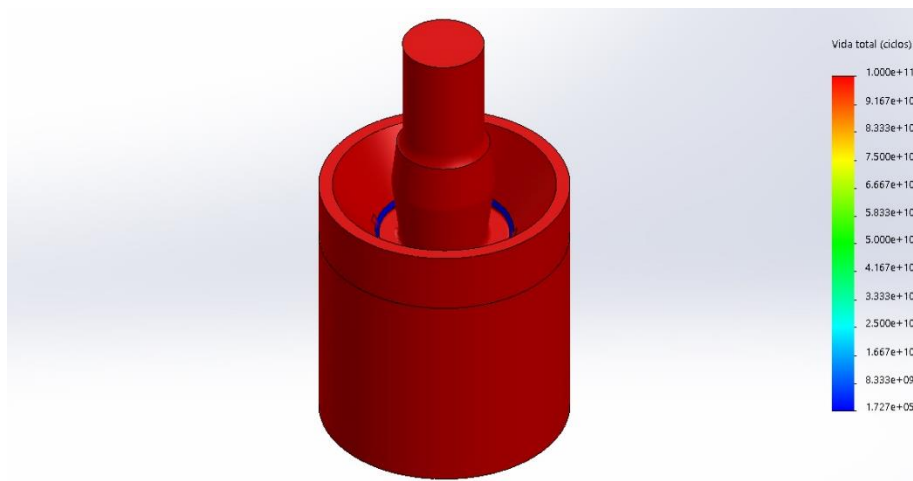


*Fuente: Propia*

### 10.6. Vida Total

En la siguiente ilustración se observa el número de ciclos encontrados, donde para los cojinetes el daño por fatiga es mayor en comparación al de restos de piezas, esto se observa en la vida útil contando con  $1,727 \times 10^5$  ciclos para los cojinetes y tanto como para las bases y eje, presentan vida infinita con un valor de  $1 \times 10^{11}$ .

*Ilustración 31: Vida Total.*



*Fuente: Propia*

### 10.7. Factor de Carga

El factor de carga muestra que si las cargas actuales se multiplican por 1,176 (factor mínimo de carga) el diseño propuesto fallaría.

*Ilustración 32: Factor de carga.*

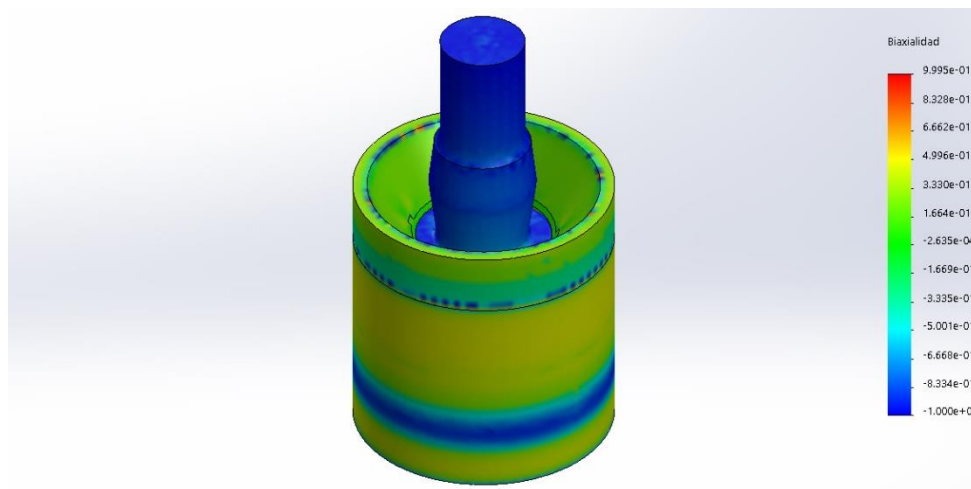


*Fuente: Propia*

### 10.8. Indicador de Biaxialidad

El factor de biaxialidad es importante porque las tensiones biaxiales pueden acelerar el proceso de fatiga, donde en zonas donde el valor es igual a 1, entonces, significa que las tensiones principales en ambas direcciones son iguales, quiere decir que se está experimentando tensiones uniformes. Y para valores menores a 1, existe asimetría en las tensiones y combinación de tensiones de tracción y compresión en diferentes direcciones.

*Ilustración 33: Indicador de Biaxialidad.*



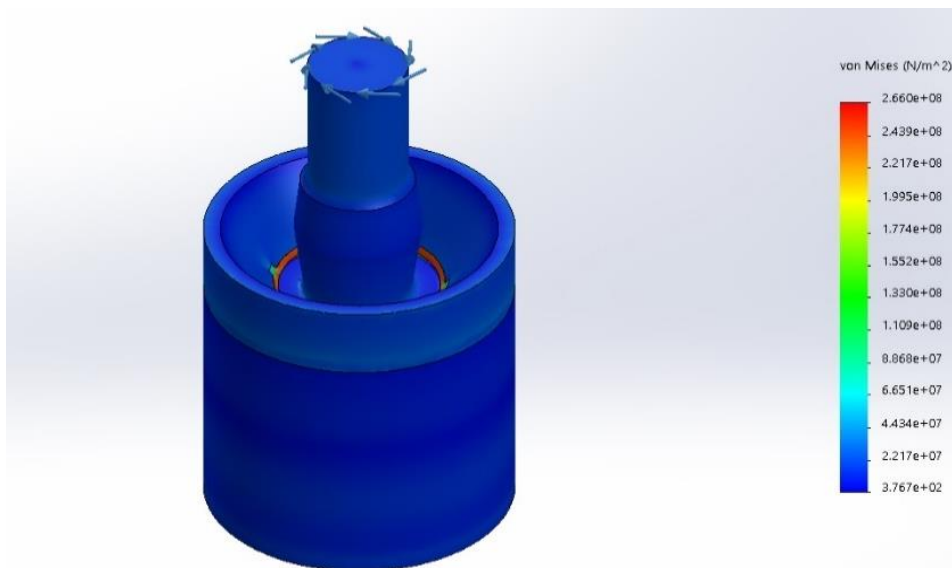
*Fuente: Propia*

11. Análisis de falla por fatiga del terminal de dirección con cojinetes de material Epoxy reforzado con fibra de carbono de 75% de factor volumétrico mediante el software SolidWorks.

#### 11.1. Distribución de tensiones

El análisis ayuda a representar el comportamiento que tendrá las cargas y torque en el terminal de dirección e identificar la distribución de tensiones de Von Misses. Donde se muestra que existe la mayor tensión de  $2,66 \times 10^{+8}$  pa, en la parte de los cojinetes y la parte esférica del eje de la rótula.

*Ilustración 34: Distribución de tensiones.*

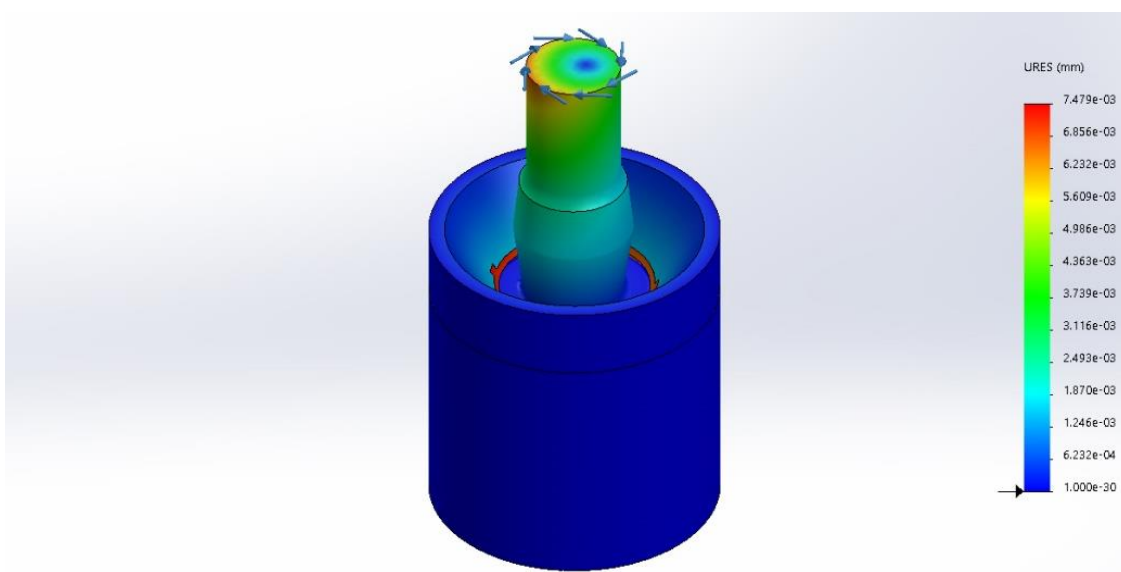


*Fuente: Propia*

## 11.2. Desplazamiento

Se logra observar que los elementos que sufren mayor desplazamiento son los cojinetes y el eje de la rótula, en donde el máximo desplazamiento es de 0,02051 mm.

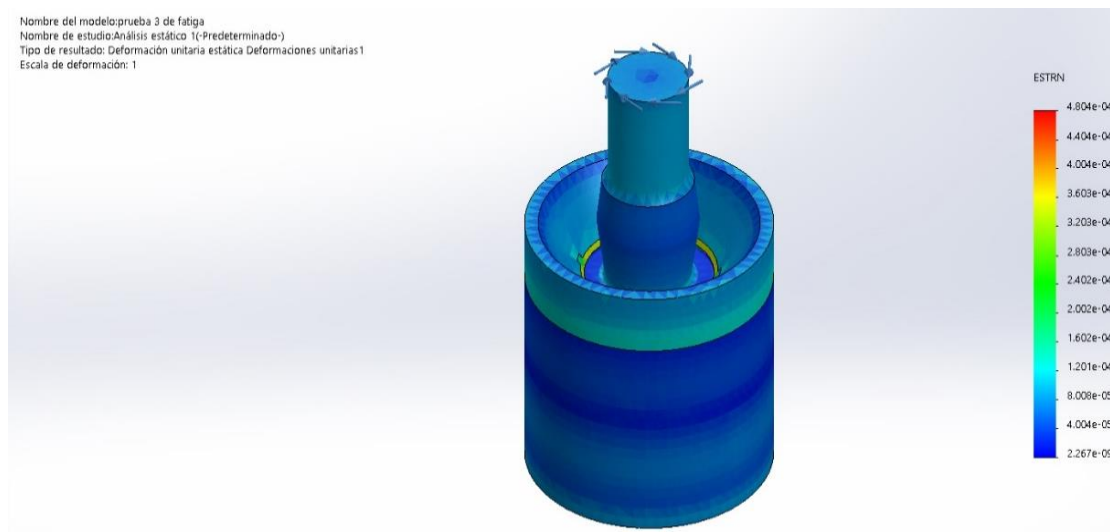
*Ilustración 35: Desplazamiento.*



*Fuente: Propia*

### 11.3. Deformaciones unitarias

*Ilustración 36: Deformaciones unitarias.*

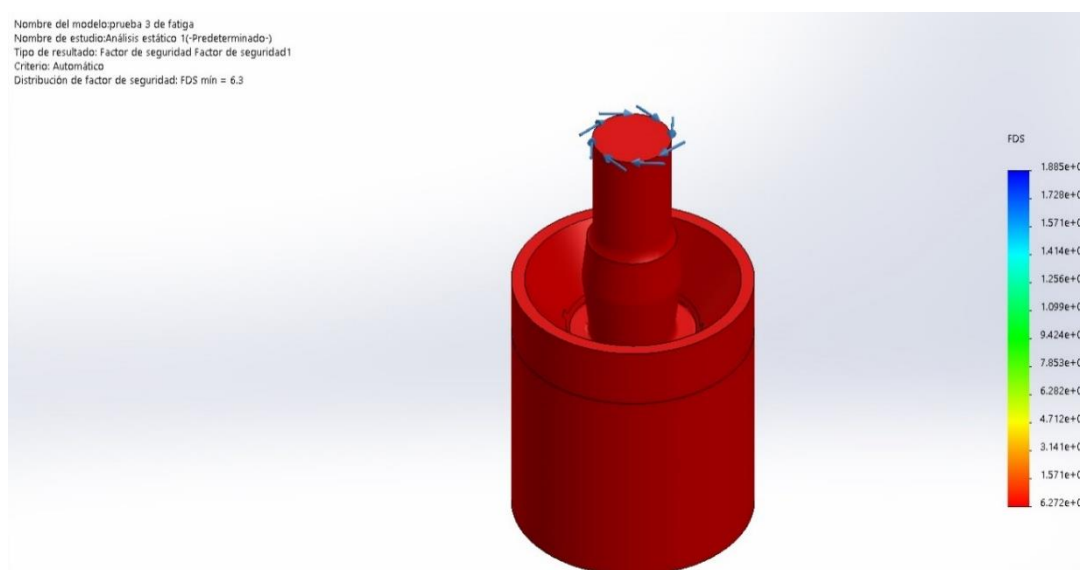


*Fuente: Propia*

### 11.4. Factor de seguridad

El factor de seguridad es la correlación que existe entre la tensión de uso sobre la carga de falla, de esta manera el software ayuda a determinar la seguridad del diseño. Para el diseño propuesto existe un factor de seguridad mínimo de 6,3.

*Ilustración 37: Factor de Seguridad.*

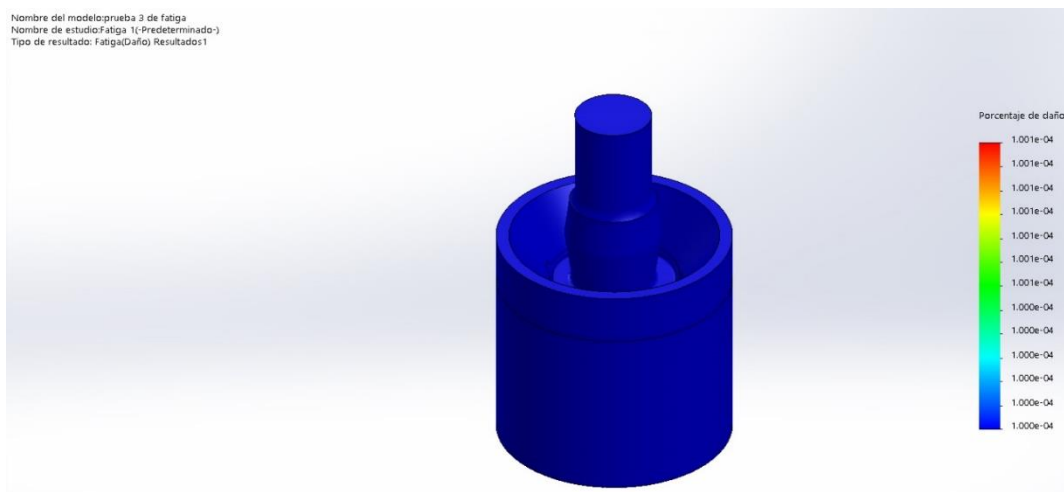


*Fuente: Propia*

### 11.5. Daño acumulado

Se observa que el modelo tiene un daño acumulado menor al 0 %, por lo que se considera que los cojinetes y el resto de los componentes no presentan daño.

*Ilustración 38: Daño acumulado.*

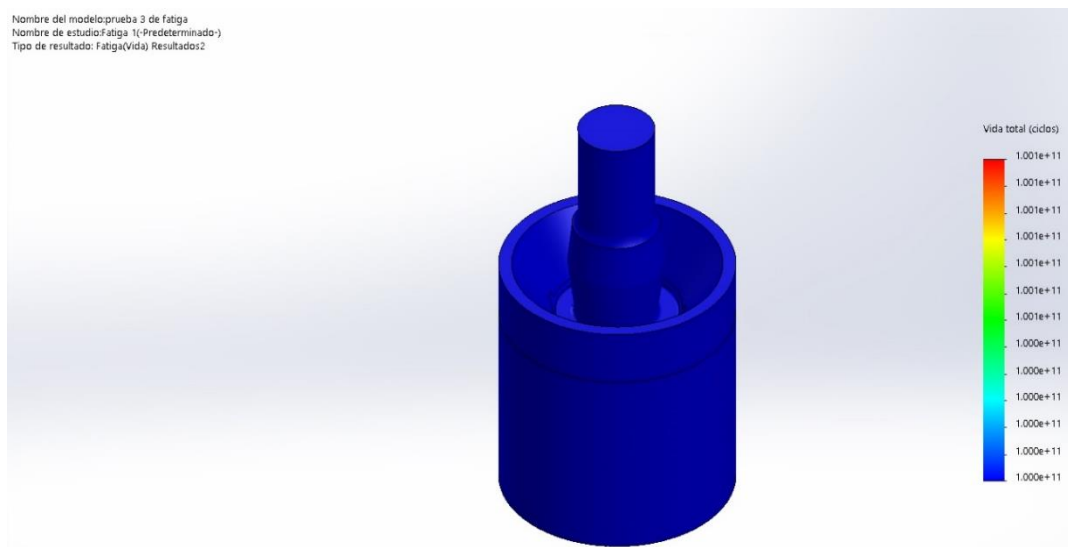


*Fuente: Propia*

### 11.6. Vida Total

En la siguiente ilustración se observa el número de ciclos encontrados, donde se observa que la vida útil para todo el terminal de dirección es de un valor de  $1 \times 10^{11}$  por lo que se considera que la pieza tendrá vida infinita.

*Ilustración 39: Vida Total.*



*Fuente: Propia*

### 11.7. Factor de Carga

El factor de carga muestra que si las cargas actuales se multiplican por 2,611 (factor mínimo de carga) el diseño propuesto fallaría.

*Ilustración 40: Factor de Carga.*

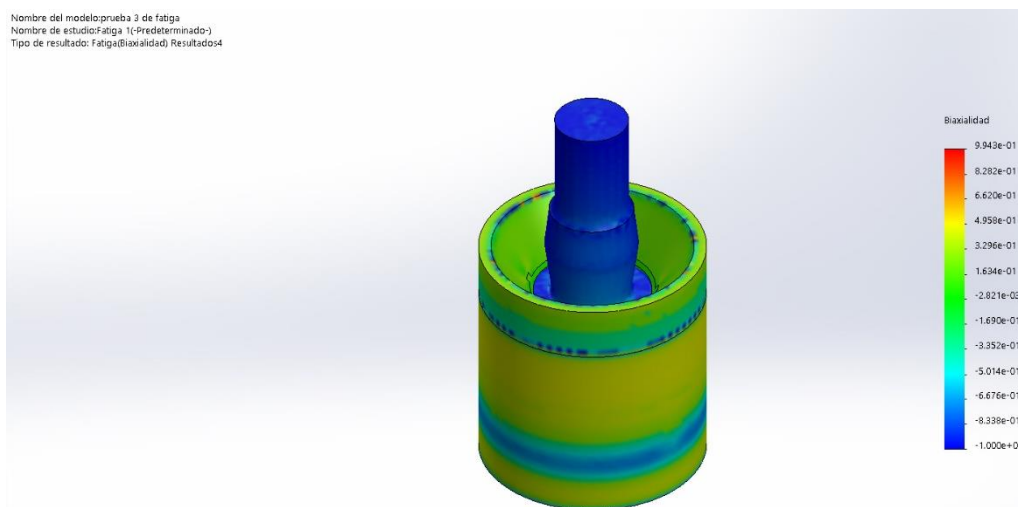


*Fuente: Propia*

### 11.8. Indicador de Biaxialidad

El factor de biaxialidad es importante porque las tensiones biaxiales pueden acelerar el proceso de fatiga, donde en zonas donde el valor es igual a 1, entonces, significa que las tensiones principales en ambas direcciones son iguales, quiere decir que se está experimentando tensiones uniformes. Y para valores menores a 1, existe asimetría en las tensiones y combinación de tensiones de tracción y compresión en diferentes direcciones.

*Ilustración 41: Indicador de Biaxialidad.*



*Fuente: Propia*

12. Comparar el aumento de la vida útil de la pieza mecánica utilizando materiales compuestos CFRP con respecto al material original.

Para comparar el aumento de la vida útil se realizó un cuadro comparativo en donde se reflejan los números máximos y mínimos de ciclos para la vida útil del terminal de dirección.

En el cuadro siguiente se resume los valores de vida útil obtenidos para el material epoxy reforzado con fibra de carbono y para el material acero AISI 4340.

*Tabla 28: Características del análisis de fatiga.*

N°	MATERIALES			
	Epoxy/Fibra de carbono 75% fv.		Acero AISI 4340	
	Nodo	Valor (CICLOS)	Nodo	Valor (CICLOS)
1	5499	$1.000 \times 10^{11}$	5499	$1,727 \times 10^5$
2	19	$1.000 \times 10^{11}$	19	$1,000 \times 10^{11}$

*Fuente: Propia*

Se evidencia en el nodo N° 1 el cual se encuentra en la zona crítica del cojinete, al utilizar el acero se tendrá un numero de ciclos inferior en comparación al material CFRP incrementa la vida útil, dando como resultado la vida infinita del terminal de dirección.

#### 12.1. Estructurar el costo del diseño propuesto.

Se estimará el costo del terminal de dirección, dado por partidas como: piezas que conforman el ensamble, material a utilizar, equipos e insumos de fabricación.

Se determinará los volúmenes y las densidades de cada pieza que conforma el terminal de dirección. Para el volumen su utilizó la función propiedades físicas del Software CAD y para el cálculo de densidades material se extrajo del Software Ansys Granta Edupack.

Tabla 29: Características del análisis de fatiga.

ITEM	VALOR	UNIDAD
<b>1. PIEZAS QUE CONFORMAN EL ENSAMBLE</b>		
<b>1.1. EJE DE ROTULA</b>		
Volumen	0,0000288	m <sup>3</sup>
Densidad del material (material CFRP)	2110	Kg/cm <sup>3</sup>
<b>1.2. COJINETE DE ROTULA</b>		
Volumen	3,9	m <sup>3</sup>
Densidad del material (material CFRP)	2110	Kg/cm <sup>3</sup>
<b>1.3. BASE DE LA ROTULA</b>		
Volumen	0,000151	m <sup>3</sup>
Densidad del material (material acero aleado)	7790	Kg/cm <sup>3</sup>

Fuente: Propia

En la tabla se demuestra que para la densidad se considera los materiales con los que serán fabricados, en donde las piezas como el eje de rotula y los cojinetes son base de material CFRP y la base de la rotula se considera el material acero aleado AISI 4043.

Posteriormente, se determina el precio del material prima.

Tabla 30: Características del análisis de fatiga.

ITEM	VALOR	UNIDAD
<b>2. MATERIALES A UTILIZAR</b>		
<b>2.1. EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 75 % DE FACTOR VOL.</b>		
Precio del material	351	Soles/Kg
<b>2.2. ACERO ALEADO AISI 4043</b>		
Precio del material	4,48	Soles/Kg

Fuente: Propia

Entonces, se determina el precio total por pieza en base a su volumen, densidad y precio unitario del material.

*Tabla 31: Características del análisis de fatiga.*

ITEM	VALOR	UNIDAD
<b>3. PRECIO DE MATERIAL POR PIEZA</b>		
<b>3.1. EJE DE ROTULA</b>		
Precio parcial	21,329568	Soles
<b>3.2. COJINETE DE ROTULA</b>		
Precio parcial	28,88379	Soles
<b>3.3. BASE DE LA ROTULA</b>		
Precio Total	5,27094483	Soles
<b>PRECIO TOTAL DEL MATERIAL</b>	<b>55,4843028</b>	<b>Soles</b>

*Fuente: Propia*

Además, se estima el precio de insumos y servicios para la fabricación del terminal de dirección.

*Tabla 32: Características del análisis de fatiga.*

ITEM	PRECIO (Soles)	UNIDAD
<b>4. INSUMOS Y SERVICIOS</b>		
<b>4.1. Varios</b>		
Aditivos	65	gl
Agua	5	H
Electricidad	8	H
Ing. Mecánico	18	H/H
Supervisor de Calidad	20	H/H
Técnico mecánico	15	H/H
Maquinaria	115	H/M
<b>TOTAL DE INSUMOS (SOLES)</b>	<b>246</b>	

*Fuente: Propia*

Por último, se calcula la estructura de costos del terminal de dirección a partir de los costos de las partidas calculadas en las tablas anteriores.

*Tabla 33: Características del análisis de fatiga.*

<b>COSTO TOTAL DEL TERMINAL DE DIRECCION</b>	<b>PRECIO TOTAL (SOLES)</b>
PRECIO TOTAL DEL MATERIAL	55,48
TOTAL DE INSUMOS (SOLES)	246
<b>SUBTOTAL</b>	<b>301,48</b>
IGV	0,18
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>355,75</b>

*Fuente: Propia*

Teniendo así, el costo estimado de fabricación de 355,75 incluyendo IGV.

## Conclusiones

1. Se diagnosticó la situación actual del terminal de dirección de los tractores agrícolas mediante fichas técnicas de mantenimiento, bibliografías y linkografías en las cuales se concluye que la pieza mecánica no se encuentra dentro de los periodos de mantenimiento, porque se considera de una sola vida útil, esto quiere decir que a la pieza no se le hace mantenimiento hasta que sufra una falla catastrófica. Además, mediante matrices de necesidades y métricas nos da como resultado que la pieza mecánica debe poseer materiales que sea de mayor resistencia a la fluencia.
2. El material analizado de matriz polimérica fueron el de epoxy, vinil y poliéster reforzado con fibra de carbono con diferentes grados de concentración en el cual mediante el software Granta Edupack se hizo el análisis para factores volumétricos de 25%, 50,1% y 85% de factor volumétrico, dando como resultado de material a utilizar el **epoxy reforzado con fibra de carbono de modulo ultra alto con 85% de factor volumétrico** el cual se seleccionó mediante límites de resistencia a la fluencia superior a los 1800 MPa y costo de limite no superior a los 140 soles/Kg.
3. Mediante la metodología de diseño se consideró utilizar cojinetes y el eje muñón de material CFRP y mientras que la base del material original (Acero AISI 4340) para el costo no muy elevado de fabricación, en donde para la simulación de fatiga dio como resultado la tensión máxima de  $2,66 \times 10^8$  Pa y vida útil del equipo de  $1,000 \times 10^8$  de ciclos. Además, se realizó el análisis de la pieza diseñada con el material original el cual da como resultado la tensión máxima mediante el criterio de Von Mises de  $2,672 \times 10^8$  Pa y vida útil de  $1,727 \times 10^5$  de ciclos en su punto más crítico.
4. La comparación de vida útil del terminal de dirección con materiales CFRP con respecto al material de acero da como resultado vida infinita para la pieza a base de material de epoxy/fibra de carbono, siendo la diferencia de  $9,982 \times 10^7$  ciclos de vida.
5. La estructura de costos se realizó mediante partidas en las cuales se consideró costos de material a utilizar, producción, insumos y servicios dando como resultado un costo final de 395,49 soles. Siendo superior en 58,75 soles con respecto al terminal de dirección de la marca John Deere.

## **Recomendaciones**

Se recomienda realizar un análisis térmico al terminal de dirección para poder comprobar cómo es que influye la temperatura en el desgaste del material. Además, se recomienda realizar investigaciones a cerca del proceso de adherencia de la fibra de carbono para reducir las propiedades anisotrópicas del material y se asemeje lo mayormente posible a las propiedades isotrópico esto con el fin de que todas sus propiedades sean iguales en todas las direcciones del espacio.

## Referencias

- [1] Webmaster Brainstorming, "Maquinaria agrícola: Importancia, usos y tipos," *MASA Equipos Industriales - New Holland*, 2022.
- [2] A. Bermejo y Z. Ingeniero, "Antonio Bermejo Zuazúa Ingeniero Agrónomo," *Gob.es*.
- [3] R. Gonzales, "Sistema de dirección en vehículos", *Modulo CIRF*, 2009
- [4] "SISTEMA DE DIRECCIÓN", *U de Santiago de Chile*.
- [5] F. Pabon, "Modelos dinámicos para terminales de dirección y suspensión, *Universidad de los Andes*, 2005.
- [6] E. Teran, "Diseño y simulación de una barra estabilizadora utilizando CFRP para aumentar su vida útil en un auto Toyota Yaris Gr", *USAT*, 2023.
- [7] P. Ruiz Medianero, "INVESTIGACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO COMO MÉTODO DE REFORZAMIENTO", *USAT*, 2020.
- [8] R. Huaccha, H. Quispe, "Resistencia Mecánica de Ballestas Automotriz con Fibra de Carbono Comparado con Acero Convencional", *Universidad Cesar Vallejo*, 2022.
- [9] R. Bonilla Silva, "Análisis del uso de Polímero Reforzado con fibras (FRP) como material estructural para el diseño de puentes peatonales", *Universidad Nacional de Chimborazo*, 2021.
- [10] Instituto Navarro de Salud Laboral, "El tractor agrícola", *Instituto Navarro de Salud Laboral*.
- [11] F. Domingo Molina Aiz, "Motores y máquinas agrícolas", *Universidad de Almería*, 2008.
- [12] F. Gutiérrez Rodríguez, "EQUIPAMIENTO TECNOLÓGICO DEL TRACTOR", *Unidad de aprendizaje N° IV de equipamiento tecnológico de los tractores agrícolas de la carrera de ingeniero agrónomo en floricultura*, 2015.
- [13] Iveco, "MR 10 Daily Dirección Trw.pdf", *Manual de reparaciones*.
- [14] N. GEREN, O. OKTAY, E. UNVER, J. ALLPORT; "Automated sizing of automotive steering ball joints in parametric CAD environment using expert knowledge and feature-based computer-assisted 3D modelling", *Advanced Engineering Informatics*, 2022.
- [15] Normas ISO. "Norma ISO 286," *Normas ISO*, 2023.
- [16] John Deere. "Manuales y publicaciones," *John Deere*, 2023.

- [17] Tractores Agrícolas. "Manual de usuario para tractor KUBOTA," *Tractores Agrícolas*. [PDF].
- [18] Massey Ferguson. "Manual de usuario para la Serie 4200 - Alta Potencia, Parte 7," *Massey Ferguson*. [PDF].
- [19] O. Villalobos Quispe, Estimación de la vida útil del eje de accionamiento de una trituradora de impacto de eje horizontal a través del análisis de falla por fatiga (Tesis de pregrado), Chiclayo, 2019
- [20] SolidWorks. "Protección contra fallas utilizando el criterio de Von Mises," *SolidWorks Help*, 2010.
- [21] L. E. FERNANDES MONTENEGRO, Análisis de falla por fatiga para determinar la vida útil del eje principal de un molino de martillo triturador (Tesis de pregrado), Chiclayo, 2022.
- [22] SafetyCulture. "Factor de seguridad," *SafetyCulture*, 2023.
- [23] J. MARÍN, J. JUSTO, F. PARÍS, J. CAÑAS; Caracterización a fatiga de compuestos de fibra de carbono unidireccional a 0° y 15° (Proyecto de fin de carrera), Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales - Universidad de Sevilla, 2013.
- [24] Prisma CIM. "Diseño mecánico," *Prisma CIM*.
- [25] A. Guarnido, "Determinación de duración de herramientas de torno bajo diferentes condiciones de corte", *Universidad de Sevilla*, 2015

## Anexos

## EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICICO

<b>Price</b>				
Price	①	92.6	- 184	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.82e3	- 1.89e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	189	- 201	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.22e3	- 1.23e3	MPa
Tensile strength	①	1.23e3		MPa
Compressive strength	①	560	- 770	MPa
Flexural modulus	①	189	- 201	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	560	- 770	MPa
Shear modulus	①	5.66	- 8.67	GPa
Bulk modulus	①	17.2	- 18	GPa
Poisson's ratio	①	0.185	- 0.3	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	40.4	- 101	W/m.°C
Specific heat capacity	①	950	- 1.07e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.44	- 1.06	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	1.26e5	- 3.15e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	179	- 199	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	11.8	- 13.2	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Epoxy (mineral filler) Fiber = Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO ALTO – 75 % DE FACTOR VOLUMETRICICO

<b>Price</b>				
Price	①	136	- 271	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.81e3	- 1.87e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	280	- 296	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.81e3	- 1.82e3	MPa
Tensile strength	①	1.81e3	- 1.82e3	MPa
Compressive strength	①	560	- 770	MPa
Flexural modulus	①	280	- 296	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	560	- 770	MPa
Shear modulus	①	10.8	- 16.6	GPa
Bulk modulus	①	31.3	- 32.6	GPa
Poisson's ratio	①	0.0975	- 0.25	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	60.2	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	①	826	- 899	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.81	- 0.56	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	8.41e4	- 2.11e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	224	- 249	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	15.5	- 17.2	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Epoxy (mineral filler) Fiber = Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO MUY ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	120	- 138	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.88e3	- 1.94e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	270	- 297	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	937	- 954	MPa
Tensile strength	①	1.06e3		MPa
Compressive strength	①	560	- 770	MPa
Flexural modulus	①	270	- 297	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	560	- 770	MPa
Shear modulus	①	5.71	- 8.7	GPa
Bulk modulus	①	17.3	- 18.1	GPa
Poisson's ratio	①	0.185	- 0.3	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	40.4	- 101	W/m.°C
Specific heat capacity	①	943	- 1.06e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.62	- 0.828	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	200	- 3.15e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	502	- 560	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	34.8	- 38.8	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Epoxy (mineral filler) Fiber = Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO MUY ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	175	- 199	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.89e3	- 1.94e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	400	- 438	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.38e3	- 1.4e3	MPa
Tensile strength	①	1.56e3	- 1.57e3	MPa
Compressive strength	①	560	- 770	MPa
Flexural modulus	①	400	- 438	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	560	- 770	MPa
Shear modulus	①	11.1	- 16.9	GPa
Bulk modulus	①	32	- 33.4	GPa
Poisson's ratio	①	0.0975	- 0.25	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	60.2	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	①	821	- 892	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.87	- 0.48	µstrain/°C
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Epoxy (mineral filler) Fiber = Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	(i)	243	- 277	PEN/kg
Notes				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	(i)	1.95e3	- 2.06e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	(i)	350	- 422	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	937	- 947	MPa
Tensile strength	(i)	1.18e3	- 1.23e3	MPa
Compressive strength	(i)	560	- 770	MPa
Flexural modulus	(i)	350	- 422	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	560	- 770	MPa
Shear modulus	(i)	5.55	- 9.04	GPa
Bulk modulus	(i)	17.5	- 18.4	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.185	- 0.3	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	(i)	40.4	- 101	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	924	- 1.06e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	-1.74	- 0.695	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	(i)	200	- 2e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	(i)	516	- 585	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	(i)	35.9	- 40.6	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records				
Matrix = Epoxy (mineral filler)				
Fiber = Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)				
Additional attributes				
Matrix volume fraction = 49.9 %				
Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## EPOXY / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 75 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	(i)	351	- 397	PEN/kg
Notes				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	(i)	2e3	- 2.11e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	(i)	520	- 626	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	1.38e3	- 1.39e3	MPa
Tensile strength	(i)	1.74e3	- 1.81e3	MPa
Compressive strength	(i)	560	- 770	MPa
Flexural modulus	(i)	520	- 626	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	560	- 770	MPa
Shear modulus	(i)	10.8	- 17.7	GPa
Bulk modulus	(i)	32.9	- 34.9	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.0975	- 0.25	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	(i)	60.2	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	802	- 892	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	-1.93	- 0.439	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	(i)	133	- 1.33e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	(i)	713	- 807	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	(i)	50.2	- 56.9	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records				
Matrix = Epoxy (mineral filler)				
Fiber = Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)				
Additional attributes				
Matrix volume fraction = 25 %				
Reinforcement volume fraction = 75 %				

## POLIÉSTER / FIBRA DE CARBONO MODULO ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	(i)	110	- 221	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	(i)	1.42e3	- 1.62e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	(i)	186	- 198	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	1.22e3	- 1.23e3	MPa
Tensile strength	(i)	1.23e3	- 1.25e3	MPa
Compressive strength	(i)	462	- 560	MPa
Flexural modulus	(i)	186	- 198	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	462	- 560	MPa
Shear modulus	(i)	1.48	- 3.16	GPa
Bulk modulus	(i)	8.78	- 9.21	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.195	- 0.301	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	(i)	40.2	- 100	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	926	- 1.16e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	-1.34	- 2	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	(i)	1.26e5	- 3.15e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	(i)	182	- 219	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	(i)	12.1	- 14.4	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Polyester (cast, rigid) Fiber = Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## POLIÉSTER / FIBRA DE CARBONO MODULO ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	(i)	148	- 297	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	(i)	1.61e3	- 1.73e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	(i)	278	- 294	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	1.81e3	- 1.82e3	MPa
Tensile strength	(i)	1.81e3	- 1.83e3	MPa
Compressive strength	(i)	462	- 560	MPa
Flexural modulus	(i)	278	- 294	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	462	- 560	MPa
Shear modulus	(i)	2.91	- 6.23	GPa
Bulk modulus	(i)	16.7	- 17.5	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.103	- 0.251	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	(i)	60.1	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	804	- 920	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	-1.78	- 0.871	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	(i)	8.41e4	- 2.11e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	(i)	231	- 263	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	(i)	16	- 18.2	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Polyester (cast, rigid) Fiber = Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## POLIÉSTER / FIBRA DE CARBONO MODULO MUY ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	139	- 167	PEN/kg
<b>Notes</b>				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.47e3	- 1.67e3	kg/m³
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	267	- 293	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	933	- 947	MPa
Tensile strength	①	1.05e3	- 1.08e3	MPa
Compressive strength	①	462	- 560	MPa
Flexural modulus	①	267	- 293	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	462	- 560	MPa
Shear modulus	①	1.48	- 3.17	GPa
Bulk modulus	①	8.81	- 9.25	GPa
Poisson's ratio	①	0.195	- 0.301	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	40.2	- 100	W/m.°C
Specific heat capacity	①	920	- 1.15e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.55	- 1.47	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	200	- 3.15e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	565	- 670	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	39.3	- 46.4	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Polyester (cast, rigid) Fiber = Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## POLIÉSTER / FIBRA DE CARBONO MODULO MUY ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	189	- 217	PEN/kg
<b>Notes</b>				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.69e3	- 1.81e3	kg/m³
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	398	- 436	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.38e3	- 1.4e3	MPa
Tensile strength	①	1.56e3	- 1.57e3	MPa
Compressive strength	①	462	- 560	MPa
Flexural modulus	①	398	- 436	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	462	- 560	MPa
Shear modulus	①	2.93	- 6.26	GPa
Bulk modulus	①	16.9	- 17.7	GPa
Poisson's ratio	①	0.103	- 0.251	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	60.1	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	①	800	- 911	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.85	- 0.693	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	133	- 2.11e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	754	- 855	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	53.2	- 60.2	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Polyester (cast, rigid) Fiber = Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## POLIÉSTER / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	283	- 338	PEN/kg
<b>Notes</b>				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.55e3	- 1.78e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	347	- 418	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	933	- 939	MPa
Tensile strength	①	1.18e3	- 1.24e3	MPa
Compressive strength	①	462	- 560	MPa
Flexural modulus	①	347	- 418	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	462	- 560	MPa
Shear modulus	①	1.46	- 3.23	GPa
Bulk modulus	①	8.86	- 9.32	GPa
Poisson's ratio	①	0.195	- 0.301	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	40.2	- 100	W/m.°C
Specific heat capacity	①	898	- 1.14e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.68	- 1.16	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	200	- 2e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	578	- 696	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	40.3	- 48.4	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Polyester (cast, rigid) Fiber = Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## POLIÉSTER / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	378	- 436	PEN/kg
<b>Notes</b>				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.8e3	- 1.97e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	518	- 624	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.38e3	- 1.39e3	MPa
Tensile strength	①	1.74e3	- 1.82e3	MPa
Compressive strength	①	462	- 560	MPa
Flexural modulus	①	518	- 624	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	462	- 560	MPa
Shear modulus	①	2.89	- 6.41	GPa
Bulk modulus	①	17.2	- 18.1	GPa
Poisson's ratio	①	0.103	- 0.251	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	60.1	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	①	780	- 911	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.91	- 0.595	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	133	- 1.33e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	757	- 877	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	53.4	- 61.8	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = Polyester (cast, rigid) Fiber = Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## VINIL FLEXIBLE / FIBRA DE CARBONO MODULO ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	(i)	120	- 237	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	(i)	1.41e3	- 1.47e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	(i)	187	- 197	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	1.24e3	-	MPa
Tensile strength	(i)	1.24e3	- 1.25e3	MPa
Compressive strength	(i)	966	- 1.02e3	MPa
Flexural modulus	(i)	187	- 197	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	966	- 1.02e3	MPa
Shear modulus	(i)	2.12	- 2.52	GPa
Bulk modulus	(i)	5.72	- 6.69	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.179	- 0.277	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	(i)	40.2	- 100	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	1.04e3	- 1.12e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	-1.58	- 0.804	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	(i)	1.26e5	- 3.15e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	(i)	203	- 227	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	(i)	13.6	- 15.2	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = VE (flexible) Fiber = Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## VINIL FLEXIBLE / FIBRA DE CARBONO MODULO ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	(i)	154	- 306	PEN/kg
Notes Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	(i)	1.61e3	- 1.66e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	(i)	278	- 293	GPa
Yield strength (elastic limit)	(i)	1.82e3	- 1.83e3	MPa
Tensile strength	(i)	1.82e3	- 1.83e3	MPa
Compressive strength	(i)	966	- 1.02e3	MPa
Flexural modulus	(i)	278	- 293	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	966	- 1.02e3	MPa
Shear modulus	(i)	4.17	- 4.97	GPa
Bulk modulus	(i)	11.1	- 12.9	GPa
Poisson's ratio	(i)	0.0945	- 0.239	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	(i)	60	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	(i)	848	- 897	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	(i)	-1.86	- 0.47	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	(i)	8.41e4	- 2.11e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	(i)	241	- 268	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	(i)	16.8	- 18.6	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = VE (flexible) Fiber = Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## VINIL FLEXIBLE / FIBRA DE CARBONO MODULO MUY ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	154	- 176	PEN/kg
<b>Notes</b> Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.46e3	- 1.52e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	267	- 292	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	951	- 963	MPa
Tensile strength	①	1.07e3	- 1.08e3	MPa
Compressive strength	①	966	- 1.02e3	MPa
Flexural modulus	①	267	- 292	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	951	- 963	MPa
Shear modulus	①	2.13	- 2.52	GPa
Bulk modulus	①	5.73	- 6.71	GPa
Poisson's ratio	①	0.179	- 0.277	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	40.2	- 100	W/m.°C
Specific heat capacity	①	1.02e3	- 1.1e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.72	- 0.648	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	200	- 3.15e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	616	- 688	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	43	- 48	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = VE (flexible) Fiber = Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 49.9 % Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## VINIL FLEXIBLE / FIBRA DE CARBONO MODULO MUY ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	197	- 223	PEN/kg
<b>Notes</b> Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.68e3	- 1.73e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	398	- 436	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.39e3	- 1.41e3	MPa
Tensile strength	①	1.56e3	- 1.57e3	MPa
Compressive strength	①	966	- 1.02e3	MPa
Flexural modulus	①	398	- 436	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	966	- 1.02e3	MPa
Shear modulus	①	4.22	- 4.98	GPa
Bulk modulus	①	11.1	- 13	GPa
Poisson's ratio	①	0.0945	- 0.239	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	60	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	①	842	- 889	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.91	- 0.418	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	133	- 2.11e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	781	- 869	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	55.1	- 61.3	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records Matrix = VE (flexible) Fiber = Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)				
Additional attributes Matrix volume fraction = 25 % Reinforcement volume fraction = 75 %				

## VINIL FLEXIBLE / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 50.1 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	308	- 350	PEN/kg
<b>Notes</b>				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.54e3	- 1.63e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	347	- 418	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	951	- 956	MPa
Tensile strength	①	1.19e3	- 1.24e3	MPa
Compressive strength	①	966	- 1.02e3	MPa
Flexural modulus	①	347	- 418	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	951	- 956	MPa
Shear modulus	①	2	- 2.69	GPa
Bulk modulus	①	5.75	- 6.75	GPa
Poisson's ratio	①	0.179	- 0.277	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	40.2	- 100	W/m.°C
Specific heat capacity	①	994	- 1.09e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.81	- 0.562	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	200	- 2e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	627	- 713	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	43.8	- 49.8	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records				
Matrix = VE (flexible)				
Fiber = Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)				
Additional attributes				
Matrix volume fraction = 49.9 %				
Reinforcement volume fraction = 50.1 %				

## VINIL FLEXIBLE / FIBRA DE CARBONO MODULO ULTRA ALTO – 70 % DE FACTOR VOLUMETRICO

<b>Price</b>				
Price	①	392	- 443	PEN/kg
<b>Notes</b>				
Only includes contribution from specified material components (does not include processing, adhesives or additives)				
<b>Physical properties</b>				
Density	①	1.79e3	- 1.9e3	kg/m <sup>3</sup>
<b>Mechanical properties</b>				
Young's modulus	①	518	- 623	GPa
Yield strength (elastic limit)	①	1.39e3		MPa
Tensile strength	①	1.74e3	- 1.82e3	MPa
Compressive strength	①	966	- 1.02e3	MPa
Flexural modulus	①	518	- 623	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	966	- 1.02e3	MPa
Shear modulus	①	3.97	- 5.33	GPa
Bulk modulus	①	11.3	- 13.2	GPa
Poisson's ratio	①	0.0945	- 0.239	
<b>Thermal properties</b>				
Thermal conductivity	①	60	- 150	W/m.°C
Specific heat capacity	①	818	- 891	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	①	-1.95	- 0.393	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	①	133	- 1.33e5	µohm.cm
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	①	783	- 888	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	55.3	- 62.7	kg/kg
<b>Notes</b>				
Source records				
Matrix = VE (flexible)				
Fiber = Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)				
Additional attributes				
Matrix volume fraction = 25 %				
Reinforcement volume fraction = 75 %				