

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN
SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE
AERONÁUTICO

JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
RISARALDA PEREIRA
2017

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN
SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE
AERONÁUTICO

Presentado por:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

TRABAJO DE GRADO

Director
CARLOS ANDRÉS MESA MONTOYA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
RISARALDA PEREIRA
2017

CONTENIDO

CAPITULO 1	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.4 OBJETIVO GENERAL	12
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO	13
CAPÍTULO 2	14
2.1 INTRODUCCIÓN	14
2.2 APLICACIONES	14
2.3 ELEMENTOS A SOPORTAR	14
2.4 SISTEMA DE TRASPORTE TERRESTRE KUKA	16
2.5 DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DE LA ESTRUCTURA	18
2.6 DISTRIBUCIÓN DE CARGAS	19
2.7 DETERMINAR REACCIONES	22
2.8 CALCULO DE LA FUERZA PRESENTE SOBRE EL ÁRBOL	28
2.9 CALCULO DE PAR MOTOR REQUERIDO EN CADA LLANTA	28
2.10 CALCULO DE POTENCIA REQUERIDO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE	30
CAPÍTULO 3	32
3.1 INTRODUCCIÓN	32
3.2 SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRACCIÓN	32
3.3 SELECCIÓN DE MOTOR	34
3.4 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	37
CAPÍTULO 4	39
4.1 INTRODUCCIÓN	39
4.2 DISEÑO GEOMÉTRICO DE LLANTA MECANUM	39
4.3 ACOPLE DEL SISTEMA DE TRACCIÓN	45
CAPÍTULO 5	51

5.1 INTRODUCCIÓN.....	51
5.2 ELEMENTOS CRÍTICOS	51
5.3 ÁRBOL DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA	53
5.4 EJE DEI RODILLO.....	58
5.5 NÚCLEO O CUBO.....	62
CAPÍTULO 6	68
6.1 CONCLUSIONES	68
6.2 APORTES	68
6.3 RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS	70
ANEXO A.....	72
ANEXO B.....	78
ANEXO C.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del motor PW308C	16
Tabla 3. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 1	23
Tabla 4. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 2	24
Tabla 5. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 3	25
Tabla 6. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 4	26
Tabla 7. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 5	27
Tabla 8. Fuerzas presentes en el árbol debido al peso a soportar	28
Tabla 9. Par motor en cada llanta para la sollicitación 1 y 2	29
Tabla 10. Par motor en cada llanta para la sollicitación 3 y 4	29
Tabla 11. Par motor en cada llanta para la sollicitación 5.....	29
Tabla 12. Potencias requeridas en cada llanta para la sollicitación 1 y 2	30
Tabla 13. Potencias requeridas en cada llanta para la sollicitación 3 y 4	31
Tabla 14. Potencias requeridas en cada llanta para la sollicitación 5.....	31
Tabla 15. Especificaciones técnicas de servomotores equipados con reductor de engranajes planetarios.....	35
Tabla 16. Matriz de decisión.	35
Tabla 17. Análisis de independencia de malla	56
Tabla 18. Análisis de independencia de malla	60
Tabla 19. Análisis de independencia de malla	64
Tabla 20. Modos de vibración y deformación	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Nariz de la aeronave falcón 2000S	15
Figura 2. Turbo fan PW308C	15
Figura 3. Brazo robótico de tecnología Kuka	16
Figura 4. Tecnología desarrollada por Kuka.	17
Figura 5. (A) módulo de tracción; (B) módulo de elevación	17
Figura 6. (A) puntales de elevación; (B) separación de módulos.....	17
Figura 7. Armazón básico	18
Figura 8. Dimensiones del sistema de transporte terrestre medido en milímetros	19
Figura 9. distribución de cargas al centro	20
Figura 10. distribución de cargas en apoyos de elevación	20
Figura 11. Distribución de cargas en el costado del sistema de transporte terrestre	21
Figura 12. Distribución de cargas en el frente del sistema de transporte terrestre	21
Figura 13. Sin distribución de cargas externas, solo el peso del sistema de transporte terrestre	22
Figura 14. Numeración de cada apoyo	22
Figura 15. Reacciones presentes en la solicitud 1	23
Figura 16. Reacciones presentes en la solicitud 2	24
Figura 17. Reacciones presentes en la solicitud 3	25
Figura 18. Reacciones presentes en la solicitud 4	26
Figura 19. Reacciones presentes en la solicitud 5	27
Figura 20. representación de llanta omnidireccional.....	33
Figura 21. Llanta Mecanum.[9]	33
Figura 22. servomotor MCS12D17 equipado con reductor axial de engranajes planetarios	36
Figura 23. Tesla Smart Lithium Ion 18650 EV Module	37
Figura 24. Dimensiones básicas de batería.....	38
Figura 25. Cotas relacionadas a las dimensiones de la llanta Mecanum.....	39

Figura 26. Ubicación de llantas. rodillos sentido horario (H); rodillos sentido anti-horario (AH)	40
Figura 27. Llanta mecanum, rodillos en dirección horaria. (medidas en mm)	41
Figura 28. Llanta mecanum, rodillos en sentido anti-horario.(medidas en mm)	41
Figura 29. Representación de la silueta formada por los rodillos en la llanta Mecanum	42
Figura 30. elipse perfil del rodillo.	42
Figura 31. Rodillo modelado	43
Figura 32. Diseño de llanta Mecanum, sentido anti-horario	44
Figura 33. Diseño de llanta mecanum, sentido horario	44
Figura 34. Elementos que conforman el prototipo de llanta mecanum	44
Figura 35. detalle de sujeción por pernos de 10mm	45
Figura 36. Elementos de sistema de acople	46
Figura 37. acople principal	46
Figura 38. Soporte mayor	47
Figura 39. Soporte menor	47
Figura 40. Árbol de transmisión de potencia y par motor.....	47
Figura 41. Corte del sistema de tracción	48
Figura 42. mecanismo de suspensión	49
Figura 43. chumacera principal.....	49
Figura 44. Sistema de suspensión.....	50
Figura 45.Árbol de transmisión	52
Figura 46. Eje de rodillo	52
Figura 47. Núcleo o cubo de llanta mecanum.....	53
Figura 48. Mallado en el árbol de transmisión	54
Figura 49. Ubicación de los soportes.....	55
Figura 50. Representación de las cargas sobre el árbol de transmisión.....	55
Figura 51. Grafica de convergencia	56
Figura 52. Deformación total en el árbol de transmisión.....	57
Figura 53. Esfuerzo máximo sobre el árbol de transmisión	57
Figure 54. Factor de seguridad del árbol de transmisión	58
Figura 55. Mallado de eje de rodillo	58

Figura 56. Cargas y soportes en el eje del rodillo	59
Figura 57. Grafica de convergencia de malla	60
Figura 58. Deformación total del eje de rodillo.....	61
Figura 59. esfuerzo máximo. Vista isométrico	61
Figura 60. Factor de seguridad presente en el eje del rodillo	62
Figura 61. Mallado del núcleo.....	62
Figura 62. Cargas y soportes del núcleo	63
Figura 63. Grafica de convergencia de malla	64
Figura 64. Deformaciones en el núcleo debido cada modo	65
Figura 65. Deformación presente en el núcleo	66
Figura 66.Esfuerzo máximo en el núcleo.....	66
<i>Figura 67. factor de seguridad en el núcleo.....</i>	<i>67</i>

CAPITULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ingeniería Mecánica con el apoyo del grupo de investigación en Procesos de Manufactura y Diseño de Maquina, en conjunto con la Universidad de Lorraine y la Escuela Nacional de Ingenieros ENIM (ambas con sede en Francia) se encuentra trabajando en el proyecto colaborativo interinstitucional llamado Factory Futures: “la industria del futuro en el campo aeronáutico”, el cual busca proponer diferentes alternativas a las líneas de fabricación aeronáuticas existentes, que garanticen procesos de fabricación fluidos y flexibles.

Hoy en día, se utilizan sistemas de transporte aéreo con estructuras fijas y trayectorias de movimiento permanentes, que cumplen con requerimientos físicos y de integridad estructural, pero generan dificultades cuando se requiera cambios significativos línea de producción, necesitando cambiar todo el sistema de transporte y adaptarse a la nueva distribución de las estaciones de trabajo. Por esta razón, es necesario diseñar un sistema transporte terrestre, capaz de trasladar partes del turbofan o componentes aeronáuticos entre cada estación de trabajo, que cumpla con los requisitos de flexibilidad y capacidad de adaptación a diversos recorrido y trayectorias definidos por la distribución de las estaciones de trabajo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sistema de transporte terrestre requiere de una flexibilidad de movimiento que le permita desplazarse en múltiples direcciones a lo largo de la línea de ensamble de componentes aeronáuticos, problema que presentan las empresas que usan plataformas de carga diseñadas con sistemas de tracción convencional, cuyo funcionamiento es complejo y ocupan un espacio mucho mayor al interior del chasis dejando poco lugar para otras estructuras destinadas hacia el funcionamiento de la plataforma, tales como los sistemas de elevación, almacenamiento de energía e incluso los sistemas de control. Del mismo modo, afecta su entorno y capacidad de interacción con las estaciones de trabajo, haciendo que la línea de ensamble contemple trayectorias con curvas pronunciadas, ocupando gran parte del espacio que puede ser aprovechado en la planta de ensamblaje. Igualmente, La poca versatilidad que poseen los sistemas de potencia que generalmente son usados en la industria, limita a las empresas en los procesos de transporte con fuentes de energía difíciles de manipular, generalmente son estructuras de carga tirados por vehículos con motores de combustión interna, los cuales dificultan la movilidad y la capacidad de adaptación entre estaciones de trabajo.

Por lo tanto, es necesario diseñar un sistema de transmisión de potencia que permita la mayor flexibilidad posible a lo largo de la línea de ensamble y que facilite el uso de los espacios disponibles, además, la selección adecuada del sistema de potencia necesariamente debe estar balanceada en relación a la autonomía que debe satisfacer, las revoluciones por minuto y el par motor que puede entregar, con el fin de transportar de forma segura los diferentes componentes aeronáuticos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Con el desarrollo del siguiente proyecto se buscará encontrar la configuración del sistema de potencia que permita desplazar el sistema de transporte terrestre de forma segura, y a su vez con a una velocidad lo suficientemente alta como para no perder tiempo entre cada estación de ensamble, además, que se adapte a las exigencias de carga acordes a los diferentes dispositivos a transportar. Así mismo, el proyecto brindará una alternativa de solución al problema de la flexibilidad de movimiento, al seleccionar un sistema motriz que permita el desplazamiento en múltiples direcciones sin la necesidad de curvaturas pronunciadas o extensas, que hacen lento el proceso de transporte en los cambios de estación.

El proyecto Factory Futures persigue un objetivo común, que involucra diferentes áreas del conocimiento de una manera sincronizada y concurrente, que permite la participación y aporte constructivo de todos y cada de las diferentes universidades participantes. El diseño del sistema terrestre comprende un conjunto de actividades en múltiples campos del conocimiento, entre ellos la mecánica y la electrónica particularmente el diseño mecánico y la robótica, ambas con un enfoque de trabajo colaborativo. Esta diversidad de campos y áreas del conocimiento, integradas en torno a un proyecto interinstitucional, puede interesar a muchos actores para que cooperen en un ambiente interdisciplinario. En la ejecución del proyecto se considera la vinculación de siete estudiantes para la realización de trabajos de grado en la generación de prototipos virtuales originales de los mecanismos y sistemas del sistema de transporte terrestre, en las varias fases de concepción, modelado, simulación y prototipado virtual.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de transmisión de potencia mecánica para el sistema de transporte terrestre para líneas de ensamblaje aeronáutico.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la potencia requerida por el sistema de transporte con el fin del cumplir con los requerimientos de carga.
- Seleccionar el sistema de tracción y sistema motor de acuerdo a los requerimientos de potencia en el sistema de transporte terrestre.
- Diseñar el tipo de rueda seleccionado teniendo en cuenta los criterios de flexibilidad requeridos por la línea de ensamble de los componentes aeronáuticos.
- Validar la alternativa seleccionada por medio de herramientas computacionales que garantice el correcto funcionamiento del sistema de transmisión potencia.
- Generar la información técnica del proceso de diseño, con el fin de obtener la información necesaria para un futuro proceso de fabricación, contemplando las memorias de cálculo y los planos.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE GRADO

En el capítulo 2 se presenta el procedimiento para calcular las potencias y par motor demandadas en cada una de las llantas teniendo en cuenta una variedad de condiciones en los que la carga puede cambiar su punto de aplicación.

El capítulo 3 contiene el procedimiento para la selección del tipo de tecnología de llantas adecuado a las necesidades de movilidad al interior de la planta de ensamblaje, el motor eléctrico que satisfaga con los requerimientos de potencia y par motor planteadas en el capítulo 1, y por último la selección de las baterías de acuerdo a las necesidades de autonomía y de espacio al interior del sistema de transporte terrestre.

Para el capítulo 4 se diseña de forma geométrica la llanta de tecnología Mecanum y el acople entre el motor y la llanta; con las dimensiones apropiadas para suplir las necesidades del sistema de transporte terrestre tomando en cuenta la altura del chasis y el espacio designado al sistema de tracción, además, se muestra los componentes de sujeción de la llanta al motor.

En el capítulo 5, se analizan tres elementos críticos para el sistema de potencia; este análisis se hace mediante el método de elementos finitos, para determinar la integridad de estos elementos bajo las cargas impuestas por las diferentes condiciones de carga determinadas en los capítulos anteriores.

CAPÍTULO 2

CALCULO DE LA POTENCIAS Y PAR MOTOR

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo contiene el procedimiento para calcular las potencias y par motor demandadas en cada una de las llantas teniendo en cuenta una variedad de posibles casos de carga que pueden cambiar su punto de aplicación. Además, según los requerimientos definidos en la línea de ensamblaje, el cálculo de la potencia debe tener en cuenta que el sistema de transporte terrestre soportará distintos elementos aeronáuticos o equipos necesarios a ser transportados en la línea de ensamblaje.

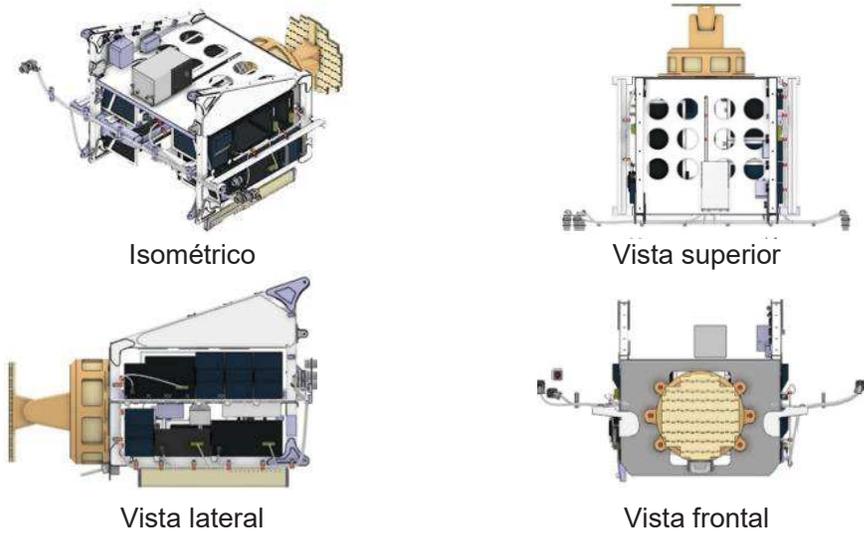
2.2 APLICACIONES

La aplicación de un sistema de tracción tiene una importante utilidad en el área de la industrial y transporte en general, pero el objetivo de este proyecto se centra en una aplicación específica para un sistema de transporte terrestre en la línea de ensamblaje, en la cual se tienen diversas condiciones tales como, una superficie de movimiento uniforme y sin cambios de nivel; lo anterior limita su uso en aplicaciones en las cuales estas dos condiciones se cumplan.

2.3 ELEMENTOS A SOPORTAR

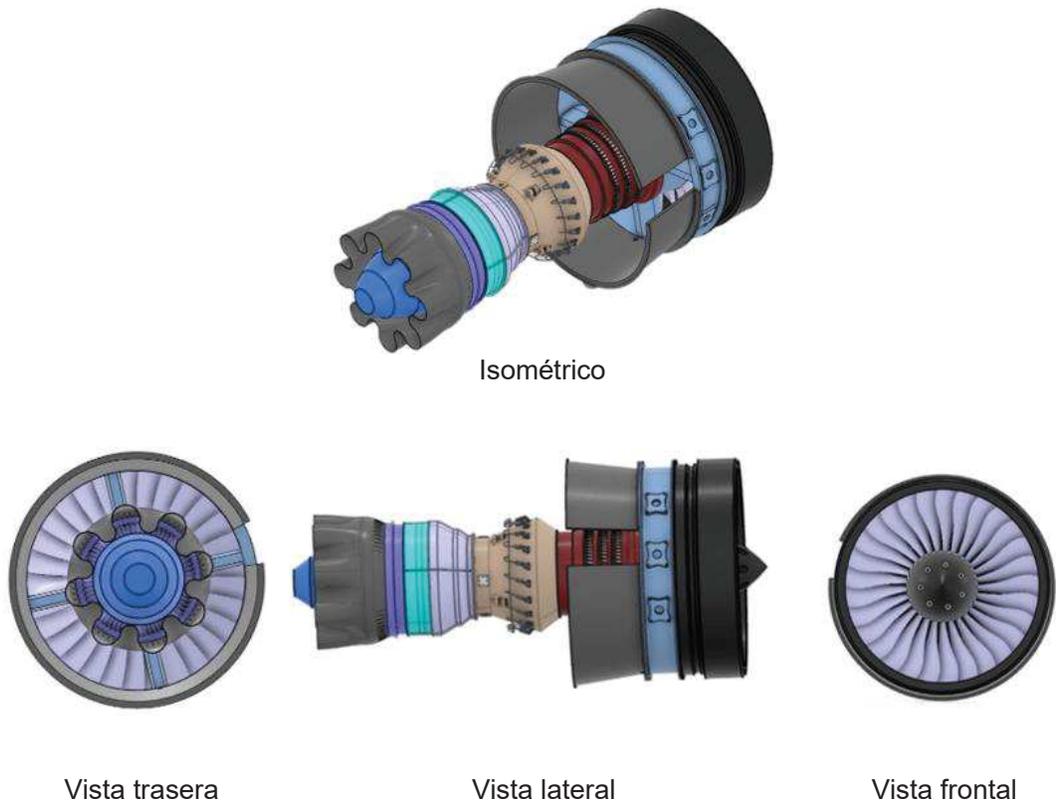
Las diferentes condiciones de carga que se deben satisfacer en la línea de ensamblaje del turbo fan y que debe soportar el sistema de transporte terrestre son: a) la nariz de la aeronave [1], b) el turbo fan [1] y c) brazo robótico [2] (ver Figura 1, *Figura 1* Figura 2 y Figura 3).

Figura 1. Nariz de la aeronave falcón 2000S



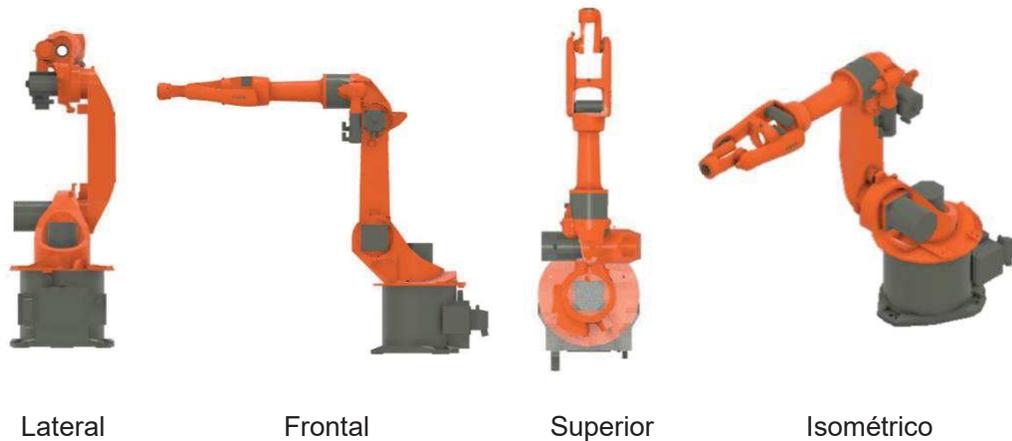
Fuente: [1]

Figura 2. Turbo fan PW308C



Fuente: [1]

Figura 3. Brazo robótico de tecnología Kuka



Fuente: [2]

El motor turbo fan falcon 2000S (PW308C) (ver Figura 2) es el elemento de mayor tamaño que debe ser soportado por el sistema de transporte terrestre por lo que se hace necesario dimensionar este elemento con la siguiente tabla:

Tabla 1. Dimensiones del motor PW308C;

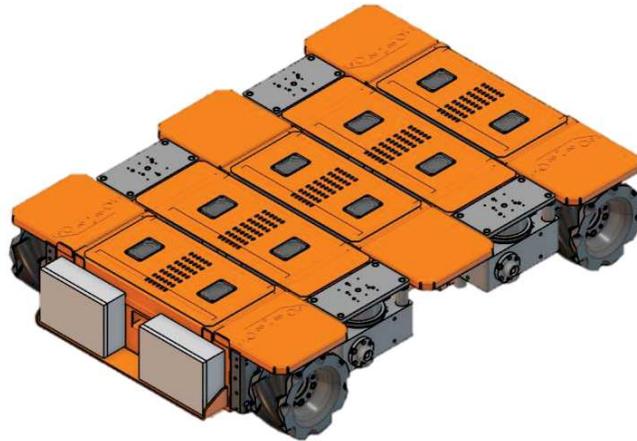
Dimensiones		Peso [kg]	Centro de gravedad medido desde el centro [m]
Largo [m]	Alto [m]		
2,184	1,299	623,500	0,220

Fuente: Julien Zins

2.4 SISTEMA DE TRASPORTE TERRESTRE KUKA

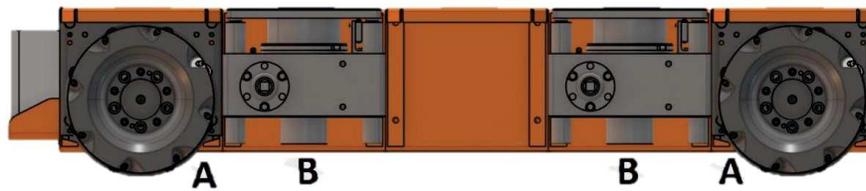
Kuka es una empresa dedicada al desarrollo y distribución de robótica e instalación de sistemas [3], la cual cuenta con tecnología en sistemas de transporte terrestre (ver Figura 4) de los cuales el proceso de vigilancia estratégica desarrollado en este proyecto toma algunos conceptos como, la distribución de las llantas, módulos y puntales de elevación (ver Figura 5 y Figura 6) y la separación de la estructura por módulos (ver Figura 6) los cuales se muestran a continuación:

Figura 4. Tecnología desarrollada por Kuka



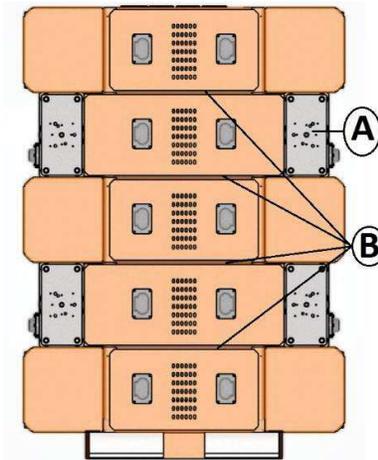
Fuente: [3]

Figura 5. (A) módulo de tracción; (B) módulo de elevación



Fuente: [3]

Figura 6. (A) puntales de elevación; (B) separación de módulos



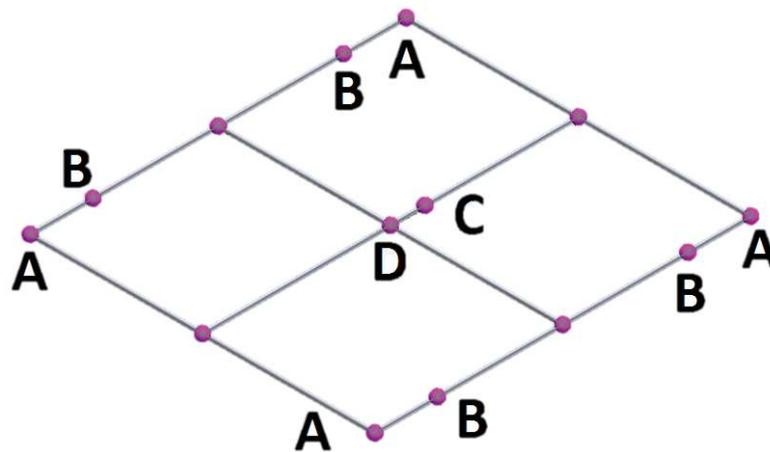
Fuente: [3]

2.5 DIMENSIONAMIENTO BÁSICO DE LA ESTRUCTURA

Este proyecto busca llegar a un diseño funcional con una distribución de los diferentes elementos antes mencionados parecidos al desarrollado por la tecnología de la empresa kuka (ver numeral 2.4).

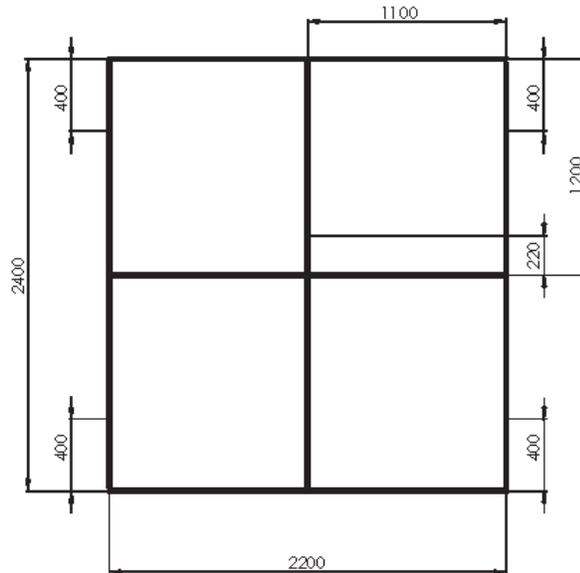
La obtención de resultados para las reacciones sobre las ruedas, se determina sometiendo el sistema de transporte terrestre a las diferentes condiciones de carga, para lo cual es preciso diseñar un armazón simple y que permita simular la estructura básica del chasis; las dimensiones para esta estructura son las distancias entre los arboles de cada llanta Mecanum (ver Figura 7 y Figura 8); este armazón es diseñado mediante la herramienta de piezas soldadas del software SolidWorks [4].

Figura 7. Armazón básico



(A) Puntos de apoyo de ruedas; (B) Puntales de elevación; (C) Aproximación al centro de gravedad del motor PW308C; (D) Centro de gravedad propio del sistema de transporte

Figura 8. Dimensiones del sistema de transporte terrestre medido en milímetros



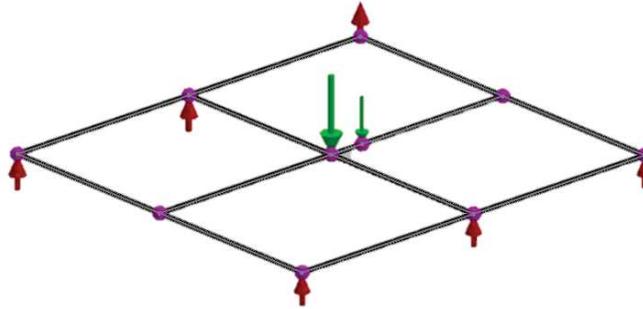
2.6 DISTRIBUCIÓN DE CARGAS

Para determinar la distribución de carga aplicada sobre la estructura, es conveniente para el análisis de fuerzas, la obtención de las reacciones presentes en los apoyos o cojinetes de cada una de las llantas. Para ello se concibió cinco tipos de solicitación que tiene en cuenta varias posibilidades de carga las cuales el sistema de transporte terrestre debe soportar sin problema.

Cada una de las configuraciones se calcula mediante un análisis estático elaborado en el software de diseño mecánico SolidWorks [4]. A Continuación, se describe cada una de las solicitaciones de carga definidas para el diseño del sistema de transporte terrestre.

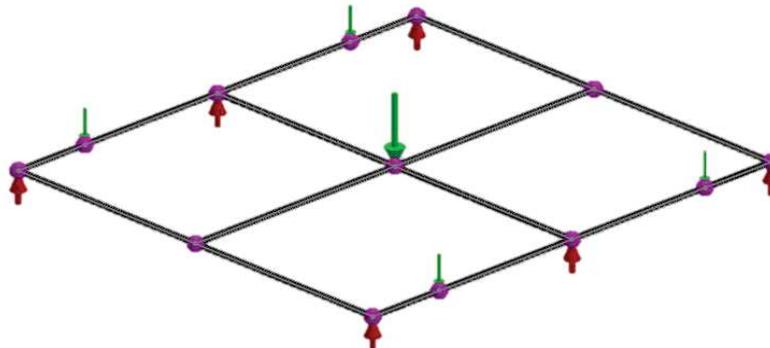
2.6.1 Solicitación 1. Condición de carga que presenta la fuerza debido al peso del propio sistema de transporte terrestre situada en la parte central de la estructura, representada con una flecha de color verde(ver Figura 9), y sus respectivas reacciones en los apoyos, representados con flechas de color rojo (ver Figura 9). Esta solicitación es bastante conservadora con la distribución de carga y tiene un pequeño corrimiento de la fuerza aplicada por el motor PW308C (ver Figura 7), representada por una flecha de color verde, a 220 mm del centro de la estructura (ver Figura 9).

Figura 9.distribución de cargas al centro



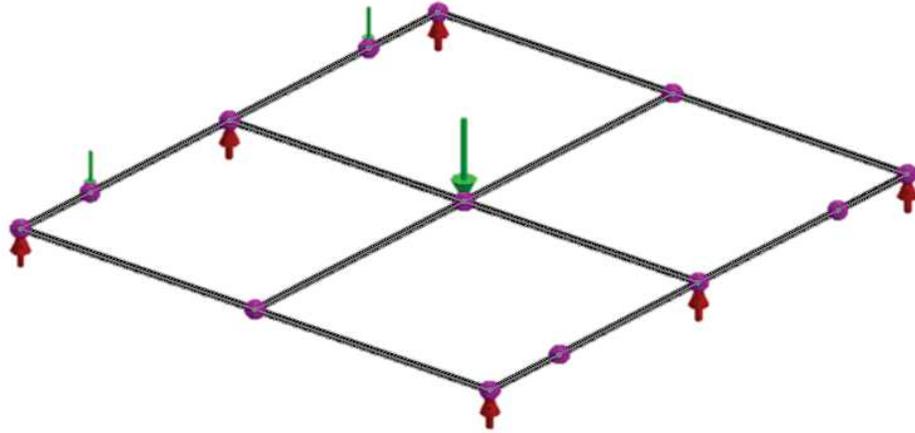
2.6.2 Solicitación 2. Esta condición es la más usual de todas las solicitaciones de carga requeridas, en la cual la carga debido al motor PW308C está situada en los cuatro módulos de elevación (ver Figura 7), los cuales soportan los armazones de anclaje para los elementos aeronáuticos; en cada módulo elevación la fuerza es representada con flechas de color verde (ver Figura 10).

Figura 10. distribución de cargas en apoyos de elevación



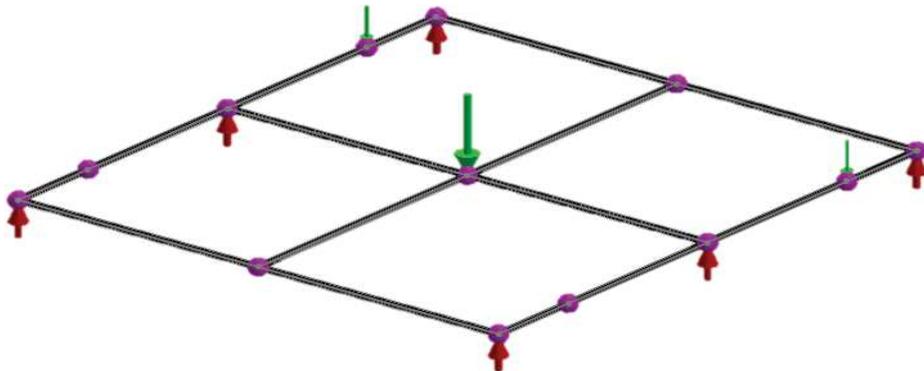
2.6.3 Solicitación 3. Para esta solicitación, las cargas debido al motor PW308C, esta situadas al costado de la estructura y soportadas por los módulos de elevación (ver Figura 7), cuyas fuerzas están representadas por flechas de color verde; Esta solicitación no es usual en las condiciones normales de funcionamiento del sistema de transporte terrestre (ver *Figura 11*).

Figura 11. Distribución de cargas en el costado del sistema de transporte terrestre



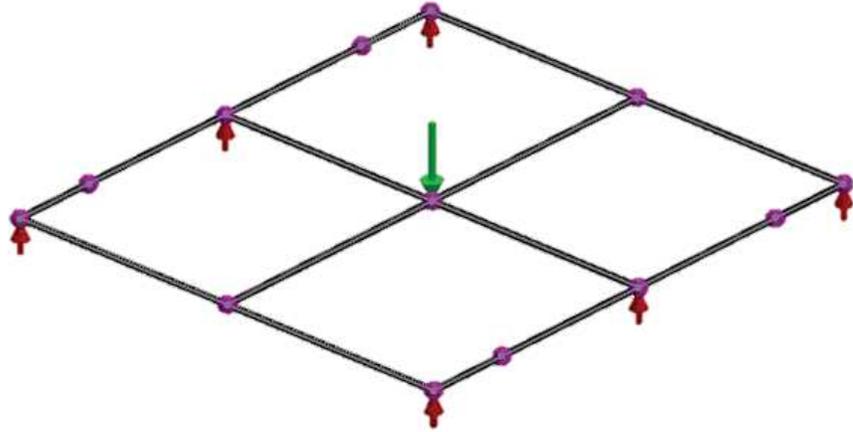
2.6.4 Solicitación 4. De forma parecida a la anterior sollicitación, la aplicación de la fuerza debido al motor se hace en tan solo dos módulos de elevación, pero en este caso, situados al frente de la estructura (ver Figura 7). Esta configuración no es usual al igual que la sollicitación 3 (ver Figura 12).

Figura 12. Distribución de cargas en el frente del sistema de transporte terrestre



2.6.5 Solicitación 5. Para la última sollicitación de carga se consideró el sistema de transporte terrestre sin cargas externas, consecuencia de lo anterior, la única carga que se ve situada en la estructura es debido al propio peso del sistema de transporte terrestre(ver Figura 7); fuerza que es representada con una flecha de color verde (ver Figura 13).

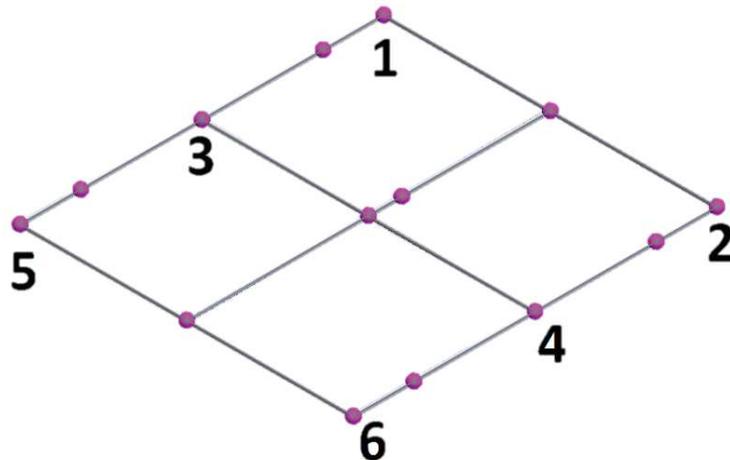
Figura 13. Sin distribución de cargas externas, solo el peso del sistema de transporte terrestre



2.7 DETERMINAR REACCIONES

Con ayuda de la herramienta de simulación estática del software Solidworks [4], se determina las reacciones presentes en los apoyos para todas las solicitaciones de carga, donde posteriormente se determinará la distribución más crítica. Para facilitar la ubicación de cada reacciones en la estructura se designó a cada uno de los apoyos un numero, como se puede ver la Figura 14.

Figura 14. Numeración de cada apoyo

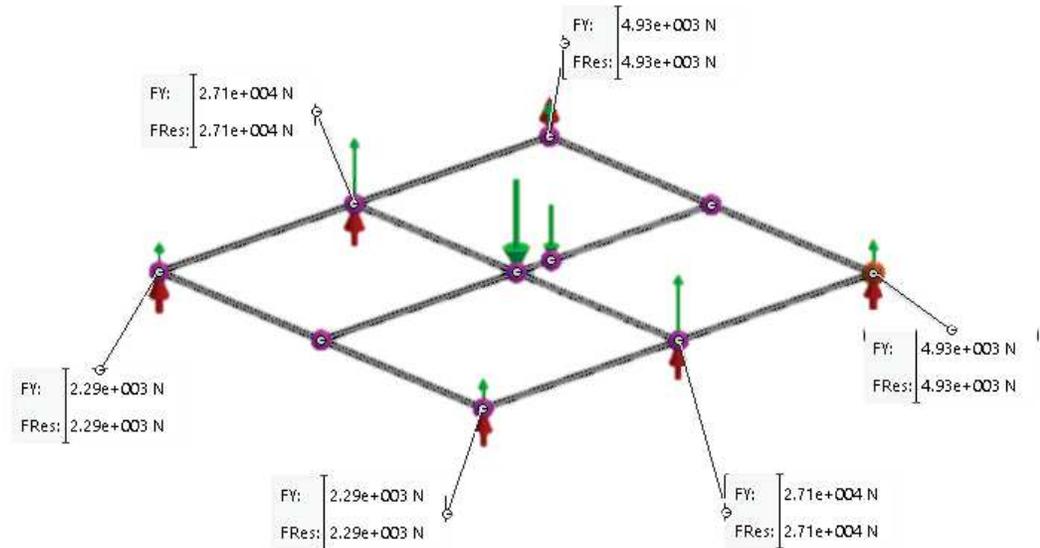


Requerimientos mínimos de carga a soportar[5]:

- Peso propio del vehículo = 4000kg
- Peso de carga representativa (turbo fan) (ver Figura 5)= 3000kg

2.7.1 Reacciones de la solicitación 1

Figura 15. Reacciones presentes en la solicitación 1



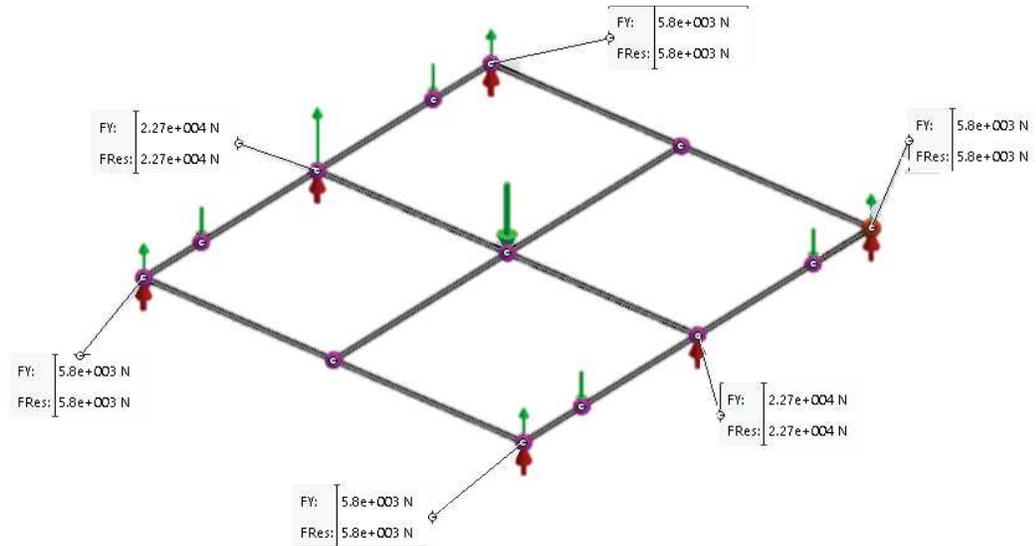
En esta solicitación (ver Figura 15) se ubica la fuerza debido al peso propio del vehículo en el nodo central (Figura 7), la ubicación de la carga se encuentra a 0.220m del nodo central (ver Figura 7 y Figura 8) en las cuales los valores máximos de las reacciones tienen una magnitud de 27100 N (ver Tabla 2).

Tabla 2. Fuerzas de reacciones para la solicitación 1

REACCIONES [N]					
Reacción 1	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5	Reacción 6
4930	4930	27100	27100	2290	2290

2.7.2 Reacciones de la sollicitación 2

Figura 16. Reacciones presentes en la sollicitación 2



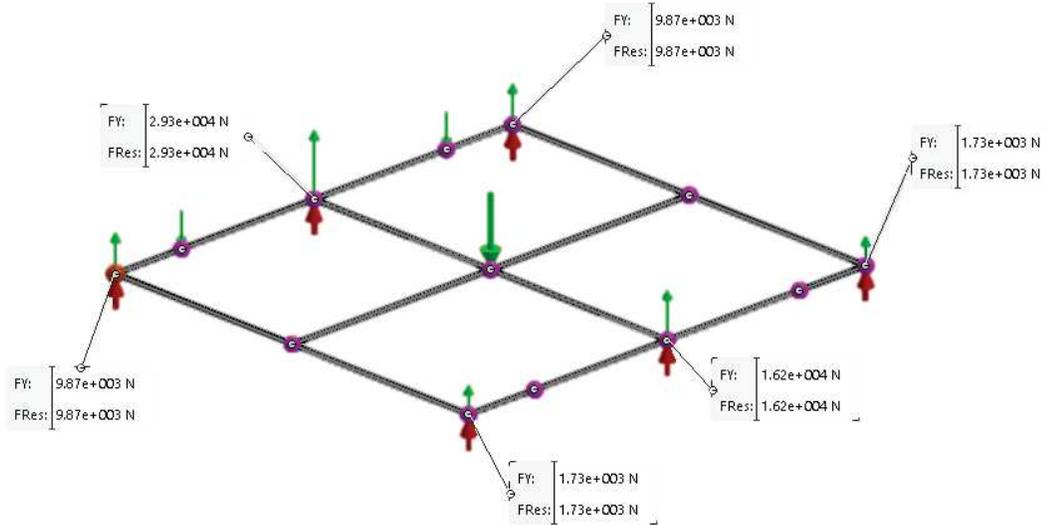
la ubicación de la carga se encuentra en los cuatro módulos de elevación (ver Figura 7, Figura 8 y Figura 16) en las cuales los valores máximos de las reacciones tienen una magnitud de 22700 N (ver Tabla 3).

Tabla 3. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 2

REACCIONES [N]					
Reacción 1	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5	Reacción 6
5800	5800	22700	22700	5800	5800

2.7.3 Reacciones de la solicitación 3

Figure 17. Reacciones presentes en la solicitación 3



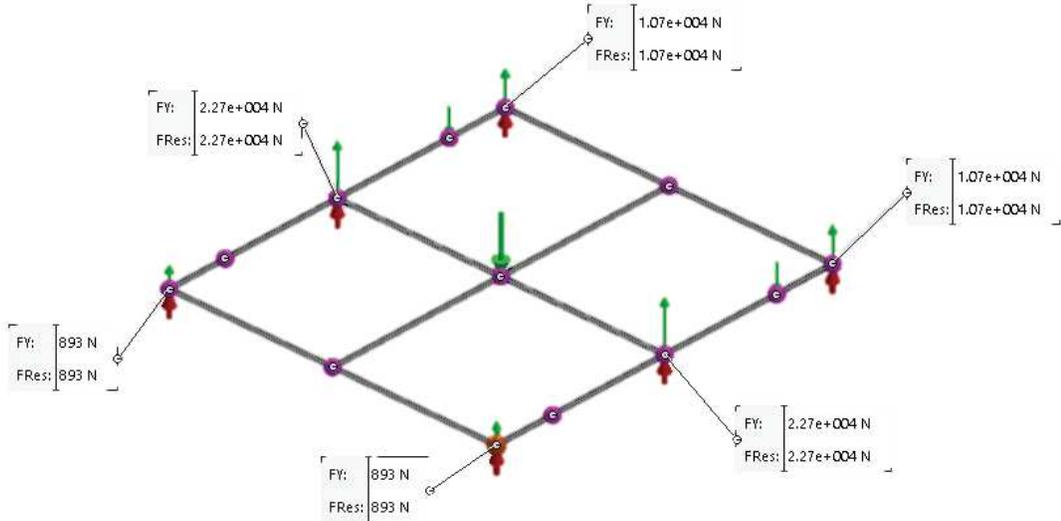
La fuerza debido al peso propio del vehículo en el nodo central (ver Figura 7), la ubicación de la carga se encuentra a un costado del sistema de transporte terrestre en dos de los puntales de elevación (ver Figura 7, Figura 8 y Figure 17) en las cuales los valores máximos de las reacciones tienen una magnitud de 29300 N (ver Tabla 4).

Tabla 4. Fuerzas de reacciones para la solicitación 3

REACCIONES [N]					
Reacción 1	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5	Reacción 6
9870	1730	29300	16200	9870	1730

2.7.4 Reacciones de la sollicitación 4

Figura 18. Reacciones presentes en la sollicitación 4



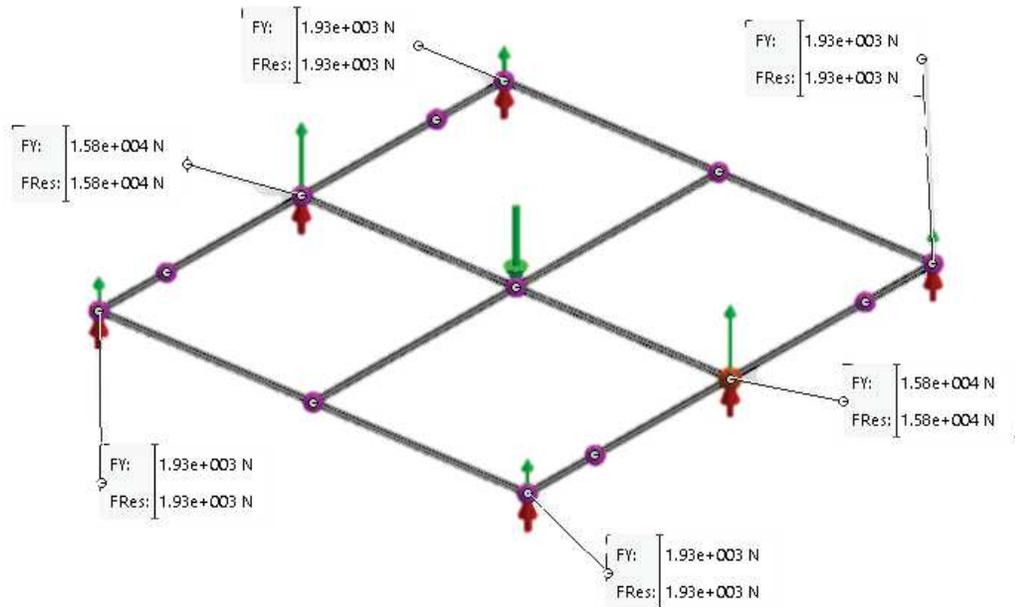
En esta sollicitación (ver Figura 18) se ubica la fuerza debido al peso propio del vehículo en el nodo central (ver Figura 7), la ubicación de la carga se encuentra en los módulos de elevación situados en frente del sistema de transporte terrestre (ver Figura 7 y Figura 8) en las cuales los valores máximos de las reacciones tienen una magnitud de 22700 N (ver Tabla 5).

Tabla 5. Fuerzas de reacciones para la sollicitación 4

REACCIONES [N]					
Reacción 1	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5	Reacción 6
10700	10700	22700	22700	893	893

2.7.5 Reacciones de la solicitación 5

Figura 19. Reacciones presentes en la solicitación 5



En esta solicitación [ver Figura 19] se ubica la fuerza debido al peso propio del vehículo en el nodo central [ver Figura 7], en el cual presenta el valor máximo de las reacciones con una magnitud de 15800 N (ver Tabla 6).

Tabla 6. Fuerzas de reacciones para la solicitación 5

REACCIONES [N]					
Reacción 1	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5	Reacción 6
1930	1930	15800	15800	1930	1930

2.8 CALCULO DE LA FUERZA PRESENTE SOBRE EL ÁRBOL

El cálculo de la fuerza presente sobre el árbol se realiza mediante el uso del concepto de resistencia a la rodadura el cual considera la deformación del material de la llanta en contacto con la superficie, causando una excentricidad de la resultante debido a que sumatoria de fuerzas de reacción sobre el rodillo. [6].

Las condiciones para las cuales se deben calcular la fuerza sobre el árbol, son determinadas por el entorno de trabajo en las instalaciones de ensamblaje para el motor turbo fan, en estas condiciones se contempla el hecho de que el área de trabajo de esta plataforma será siempre horizontal o con cambios de nivel despreciables. Además, la deformación de los rodillos presente en las llantas Mecanum u omnidireccionales es reducida en comparación a la que se puede encontrar en llantas convencionales por lo que se desprecia la excentricidad de la normal. A continuación, se presentarán los resultados del cálculo de la fuerza sobre el árbol en cada uno de las distintas solicitaciones de carga (ver anexo A para el procedimiento de cálculos) (ver Tabla 7).

Tabla 7. Fuerzas presentes en el árbol debido al peso a soportar

solicitud	Fuerza [N]					
	Reacción 1	Reacción 2	Reacción 3	Reacción 4	Reacción 5	Reacción 6
1	2465	2465	13550	13550	1145	1145
2	2900	2900	11350	11350	2900	2900
3	4935	865	14650	8100	4935	865
4	5350	5350	11350	11350	446.5	446.5
5	965	965	7900	7900	965	965

2.9 CALCULO DE PAR MOTOR REQUERIDO EN CADA LLANTA

El par motor requerido por el sistema de transporte terrestre para mover el turbo fan y su propio peso, es calculado para cada una de las llantas teniendo en cuenta los resultados obtenidos para la fuerza presente sobre su árbol (ver numeral 2.8). de la misma forma, se calcula el par motor para dos tipos de llantas, Mecanum y omnidireccional; con estos resultados se puede determinar cuál de las dos tecnologías analizadas presenta mayor beneficio para el sistema de transporte terrestre. Por lo tanto, el par motor es una característica importante en la selección del motor y llantas, del sistema de potencia. Los cálculos realizados para determinar el par motor se describen con mayor detalle en el Anexo A. Desde ahora en el documento la designación para cada tecnología, será: a) omnidireccional (O) y b) Mecanum (M).

Tabla 8. Par motor en cada llanta para la solicitud 1 y 2

	Solicitud 1				Solicitud 2			
	Par motor [Nm]		Par motor [lb-ft]		Par motor [Nm]		Par motor [lb-ft]	
	O	M	O	M	O	M	O	M
Reacción 1	156,87	110,93	115,70	81,81	184,55	130,50	136,12	96,25
Reacción 2	156,87	110,93	115,70	81,81	184,55	130,50	136,12	96,25
Reacción 3	862,32	609,75	636,01	449,73	722,31	510,75	532,75	376,71
Reacción 4	862,32	609,75	636,01	449,73	722,31	510,75	532,75	376,71
Reacción 5	72,87	51,53	53,74	38,00	184,55	130,50	136,12	96,25
Reacción 6	72,87	51,53	53,74	38,00	184,55	130,50	136,12	96,25

Tabla 9. Par motor en cada llanta para la solicitud 3 y 4

	Solicitud 3				Solicitud 4			
	Par motor [Nm]		Par motor [lb-ft]		Par motor [Nm]		Par motor [lb-ft]	
	O	M	O	M	O	M	O	M
Reacción 1	314,06	222,08	231,64	163,79	340,47	240,75	251,12	177,57
Reacción 2	55,05	38,93	40,60	28,71	340,47	240,75	251,12	177,57
Reacción 3	932,32	659,25	687,64	486,24	722,31	510,75	532,75	376,71
Reacción 4	515,48	364,50	380,20	268,84	722,31	510,75	532,75	376,71
Reacción 5	314,06	222,08	231,64	163,79	28,42	20,09	20,96	14,82
Reacción 6	55,05	38,93	40,60	28,71	28,42	20,09	20,96	14,82

Tabla 10. Par motor en cada llanta para la solicitud 5

	Solicitud 5			
	Par motor [Nm]		Par motor [lb-ft]	
	O	M	O	M
Reacción 1	61,41	43,43	45,30	32,03
Reacción 2	61,41	43,43	45,30	32,03
Reacción 3	502,75	355,50	370,81	262,20
Reacción 4	502,75	355,50	370,81	262,20
Reacción 5	61,41	43,43	45,30	32,03
Reacción 6	61,41	43,43	45,30	32,03

2.10 CALCULO DE POTENCIA REQUERIDO PARA EL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE

La potencia requerida por el sistema de transporte terrestre se calculó para la configuración de la rueda tipo Mecanum, así como, para las llantas tipo omnidireccional; potencia que se desea comparar para cada una de las solicitudes (ver numeral 2.6); el cálculo de la potencia se determina de forma individual para cada uno de las ruedas en la condición de velocidad máxima y mínima (ver Tabla 11). Los caculos realizados para determinar la potencia se encuentran en el anexo A.

Tabla 11. Potencias requeridas en cada llanta para la solicitud 1 y 2

		Solicitud 1				Solicitud 2			
		Potencia [W]		Potencia [HP]		Potencia [W]		Potencia [HP]	
		O	M	O	M	O	M	O	M
Reacción 1	v min	242,09	171,18	0,32	0,23	284,81	201,39	0,38	0,27
	v max	726,26	513,54	0,97	0,69	854,42	604,17	1,15	0,81
Reacción 2	v min	242,09	171,18	0,32	0,23	284,81	201,39	0,38	0,27
	v max	726,26	513,54	0,97	0,69	854,42	604,17	1,15	0,81
Reacción 3	v min	1330,74	940,97	1,78	1,26	1114,68	788,19	1,49	1,06
	v max	3992,21	2822,92	5,35	3,79	3344,03	2364,58	4,48	3,17
Reacción 4	v min	1330,74	940,97	1,78	1,26	1114,68	788,19	1,49	1,06
	v max	3992,21	2822,92	5,35	3,79	3344,03	2364,58	4,48	3,17
Reacción 5	v min	112,45	79,51	0,15	0,11	284,81	201,39	0,38	0,27
	v max	337,35	238,54	0,45	0,32	854,42	604,17	1,15	0,81
Reacción 6	v min	112,45	79,51	0,15	0,11	284,81	201,39	0,38	0,27
	v max	337,35	238,54	0,45	0,32	854,42	604,17	1,15	0,81

Tabla 12. Potencias requeridas en cada llanta para la solicitud 3 y 4

		Solicitud 3				Solicitud 4			
		Potencia [w]		Potencia [HP]		Potencia [w]		Potencia [HP]	
		O	M	O	M	O	M	O	M
Reacción 1	v min	484,66	342,71	0,65	0,46	525,42	371,53	0,70	0,50
	v max	1453,99	1028,13	1,95	1,38	1576,26	1114,58	2,11	1,49
Reacción 2	v min	84,95	60,07	0,11	0,08	525,42	371,53	0,70	0,50
	v max	254,85	180,21	0,34	0,24	1576,26	1114,58	2,11	1,49
Reacción 3	v min	1438,77	1017,36	1,93	1,36	1114,68	788,19	1,49	1,06
	v max	4316,30	3052,08	5,79	4,09	3344,03	2364,58	4,48	3,17
Reacción 4	v min	795,50	562,50	1,07	0,75	1114,68	788,19	1,49	1,06
	v max	2386,49	1687,50	3,20	2,26	3344,03	2364,58	4,48	3,17
Reacción 5	v min	484,66	342,71	0,65	0,46	43,85	31,01	0,06	0,04
	v max	1453,99	1028,13	1,95	1,38	131,55	93,02	0,18	0,12
Reacción 6	v min	84,95	60,07	0,11	0,08	43,85	31,01	0,06	0,04
	v max	254,85	180,21	0,34	0,24	131,55	93,02	0,18	0,12

Tabla 13. Potencias requeridas en cada llanta para la solicitud 5

		Solicitud 5			
		Potencia [w]		Potencia [HP]	
		O	M	O	M
Reacción 1	v min	94,77	67,01	0,13	0,09
	v max	284,32	201,04	0,38	0,27
Reacción 2	v min	94,77	67,01	0,13	0,09
	v max	284,32	201,04	0,38	0,27
Reacción 3	v min	775,85	548,61	1,04	0,74
	v max	2327,56	1645,83	3,12	2,21
Reacción 4	v min	775,85	548,61	1,04	0,74
	v max	2327,56	1645,83	3,12	2,21
Reacción 5	v min	94,77	67,01	0,13	0,09
	v max	284,32	201,04	0,38	0,27
Reacción 6	v min	94,77	67,01	0,13	0,09
	v max	284,32	201,04	0,38	0,27

CAPÍTULO 3

SELECCIÓN DE LLANTAS, MOTOR Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo contiene el procedimiento para la selección del tipo de tecnología de llantas adecuado para las necesidades de movilidad al interior de la planta de ensamblaje, así como la metodología para la selección del motor eléctrico que satisfaga con los requerimientos de potencia y par motor planteadas en el capítulo 1, así como la selección de las baterías de acuerdo a las necesidades de autonomía y de espacio al interior del sistema de transporte terrestre.

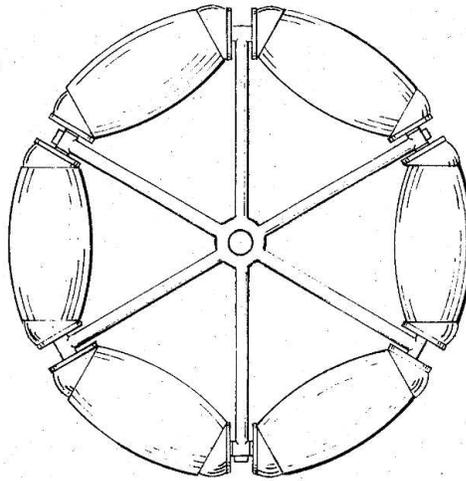
3.2 SELECCIÓN DE SISTEMA DE TRACCIÓN

3.2.1 Introducción. El sistema de transporte terrestre requiere de una flexibilidad de movimiento que le permita desplazarse en múltiples direcciones a lo largo de la línea de ensamble de componentes aeronáuticos. Lo que refleja un problema que presentan las empresas que usan plataformas de carga diseñadas con sistemas de tracción convencional, cuyo funcionamiento es complejo y ocupan un espacio mucho mayor al interior del chasis dejando poco lugar para otras estructuras destinadas hacia el funcionamiento de la plataforma. Dichos diseños afectan su entorno y capacidad de interacción con las estaciones de trabajo, haciendo que la línea de ensamble contemple trayectorias con curvas pronunciadas, ocupando gran parte del espacio que puede ser aprovechado en la planta de ensamblaje.

La poca versatilidad que poseen los sistemas de tracción convencional que generalmente son usados en la industria, hace necesario diseñar un sistema de tracción que permita la mayor flexibilidad posible a lo largo de la línea de ensamble y que facilite el uso de los espacios disponibles.

3.2.2 Sistema de tracción omnidireccional. Es un sistema de tracción compuesta por segmentos circunferenciales de caucho dispuestos de forma perimetral, permitiendo el desplazamiento sin necesidad de un mecanismo de dirección usados comúnmente en sistemas de transporte [7] (ver Figura 20).

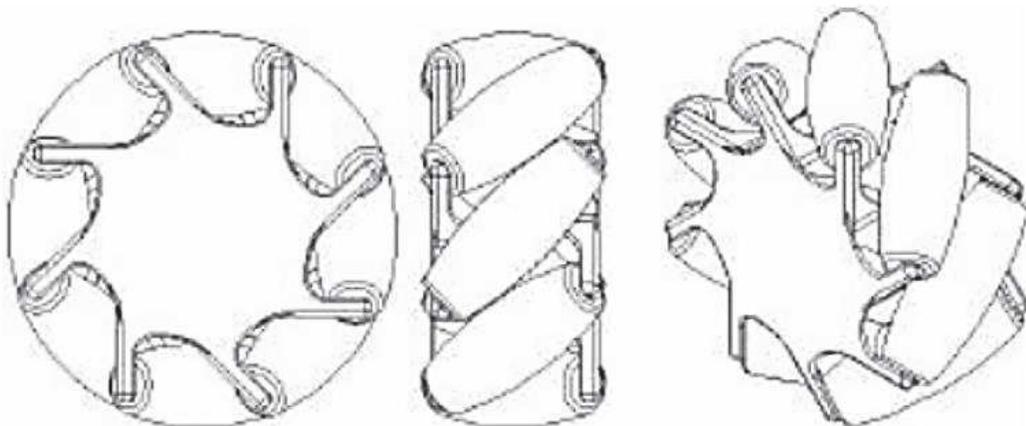
Figura 20. representación de llanta omnidireccional



Fuente: [7]

3.2.3 Sistema de tracción Mecanum. La llanta Mecanum se compone de una rueda central con rodillos colocados en su periferia con un ángulo entre el árbol de los rodillos y el eje de rotación de la rueda, ángulo que por lo general posee un valor de 45° [8]. Los rodillos semicirculares alargados en dirección longitudinal, son provistos de una perforación a lo largo de su eje y se ven en conjunto con una silueta circular desde una vista lateral (normal al eje de la rueda)(ver Figura 21) [8] [9].

Figura 21. Llanta Mecanum.[9]



Fuente: [9]

3.2.4.1 Selección de llanta. La selección se basa en los cálculos presentados en el capítulo 1, los cuales comparan los resultados obtenidos de las dos tecnologías que tienen la versatilidad de suplir la necesidad de movilidad en planta de ensamble del motor del falcom 2000s. La tecnología que se usará el sistema de transporte terrestre deberá cumplir con dos criterios: a) el par motor requerido (ver *Tabla 8*, *Tabla 9* y *Tabla 10*) y b) la potencia consumida (*Tabla 13*, *Tabla 12* y *Tabla 13*). Comparadas en las mismas condiciones de velocidad y carga (ver numeral 2.6). el par motor requerido y la potencia necesaria a desarrollar, son menores para la tecnología mecanum (ver numerales 2.8 y 2.9), por lo tanto, este tipo de llantas es la selección adecuada.

3.3 SELECCIÓN DE MOTOR

3.3.4 Introducción. El elemento motriz debe ser seleccionado para garantizar la movilidad del vehículo a las velocidades requeridas, desplazar la carga del propio peso y la carga impuesta debido al peso del motor del PW308C. Además, debe ofrecer larga autonomía con un bajo consumo y en lo posible, sin emisiones ya que se trabaja en un ambiente cerrado en una planta de ensamble. Por esta razón el elemento motriz y la clase de motores a seleccionar en este numeral, son motores eléctricos.

3.3.5 Tecnología. El tipo de tecnología de motores eléctricos que se usará en el sistema de transporte terrestre, los servomotores ofrece una mayor versatilidad para un posterior control en cuanto a velocidad y precisión de posición, adicionalmente los servomotores permiten la incorporación de una caja reductora de engranajes planetarios, el cual permite conservar un diseño compacto y con gran capacidad de proveer el par motor requerido por el sistema de transporte terrestre [10].

3.3.6 Especificaciones de motor. La empresa LENZE ofrece servomotores equipados con reductores de engranajes planetarios con la capacidad de proporcionar el par motor requerido por el sistema de transporte terrestre. En los catálogos se pueden encontrar los siguientes motores y sus especificaciones [11].

Tabla 14. Especificaciones técnicas de servomotores equipados con reductor de engranajes planetarios.

	Servo Motores	Potencia [kW]	RPM	Par-motor [Nm]	Velocidad [m/s]	Aceleración nominal [m/s ²]
Reductor g700-P800	MCS12D35	2,20	47,00	450,00	0,88	93,92
	MCS12D17	1,20	41,00	633,00	0,77	120,88
	MCS14H12	3,00	48,00	700,00	0,90	62,83
	MCS12L17	2,90	41,00	700,00	0,77	78,53

Fuente: [11]

3.3.7 Matriz de decisión. Los servomotores especificados en el numeral anterior, tiene la capacidad suficiente para proporcionar las necesidades impuestas por el sistema de transporte terrestre por lo que se hace necesario decidir por la opción más conveniente de acuerdo a las necesidades planteadas en el proyecto.

Para determinar el servomotor con mayores ventajas se usa una matriz de decisión [12], la cual utiliza un sistema ponderación. Para ello se designa un valor a cada una de las características determinantes para la selección, la suma de estos valores dados a cada una de las características debe ser 1,0 teniendo en cuenta que el mayor valor es designado a la característica más importante y el menor valor es designado a la característica menos importante. Para determinar el servomotor adecuado, se califica cada uno de las características de 1 a 10 dependiendo de la capacidad de cada servomotor. La relación entre el factor de ponderación y la calificación, es un producto entre ambos valores. Ya determinado este producto entre ponderación y calificación para cada una de las características se suman todos los productos de un mismo motor y se obtiene un rango, el cual provee de un valor que puede ser comparable entre todos los motores y facilitar la selección (ver Tabla 15).

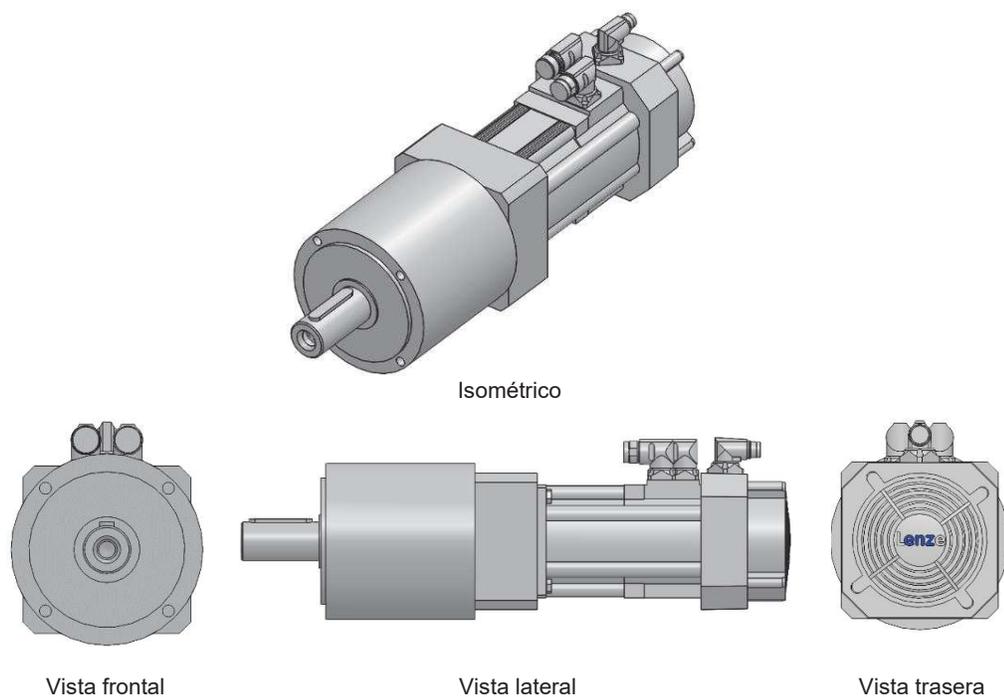
Tabla 15. Matriz de decisión.

Matriz de decisión		Velocidad	Aceleración	Par-motor	Potencia	Tamaño	Rango
Factor de ponderación		0,20	0,15	0,15	0,25	0,25	1,00
MCS12D35	Calificación	8,00	6,00	6,00	8,00	8,00	7,40
	Producto	1,60	0,90	0,90	2,00	2,00	
MCS12D17	Calificación	5,00	8,00	7,00	9,00	8,00	7,50
	Producto	1,00	1,20	1,05	2,25	2,00	
MCS14H12	Calificación	9,00	4,00	9,00	5,00	4,00	6,00
	Producto	1,80	0,60	1,35	1,25	1,00	
MCS14H13	Calificación	5,00	5,00	9,00	6,00	3,00	5,35
	Producto	1,00	0,75	1,35	1,50	0,75	

Fuente: [12]

La matriz de decisión define los servomotores de referencia MCS12D35 y MSC12D17, como las opciones que presentan mejores características, donde la selección entre cualquiera de los dos, está limitada al consumo (puesto que esta característica influye directamente en la autonomía que pueda ofrecer el sistema de transporte terrestre). Por lo tanto, se concluye que la selección del servomotor más adecuada es la referencia MCS12D17 (ver Figura 22) la cual tiene un consumo de 1.2 kW y en conjunto con el reductor axial de engranajes planetarios ofrece un par motor máximo de 633 Nm.

Figura 22. servomotor MCS12D17 equipado con reductor axial de engranajes planetarios



Fuente: [11]

3.4 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

3.4.4 Introducción. El almacenamiento de energía cumple con una importante función en el sistema de transporte terrestre. El elemento de almacenamiento de energía debe cumplir con los siguientes criterios: a) alta capacidad de potencia por hora entregada, b) bajo peso y c) dimensiones adecuadas para su ubicación al interior del chasis.

3.4.5 Batería litio-ion. Este tipo de batería de ciclo profundo, es usada usualmente en vehículos eléctricos, computadores, celulares entre otras aplicaciones. Las baterías de litio-ion usadas en vehículos Tesla, son compuesta por celdas de referencia 18650 de 18mm de diámetro y 65mm de longitud, cada batería puede contener hasta 6800 de estas celdas [13] [14].

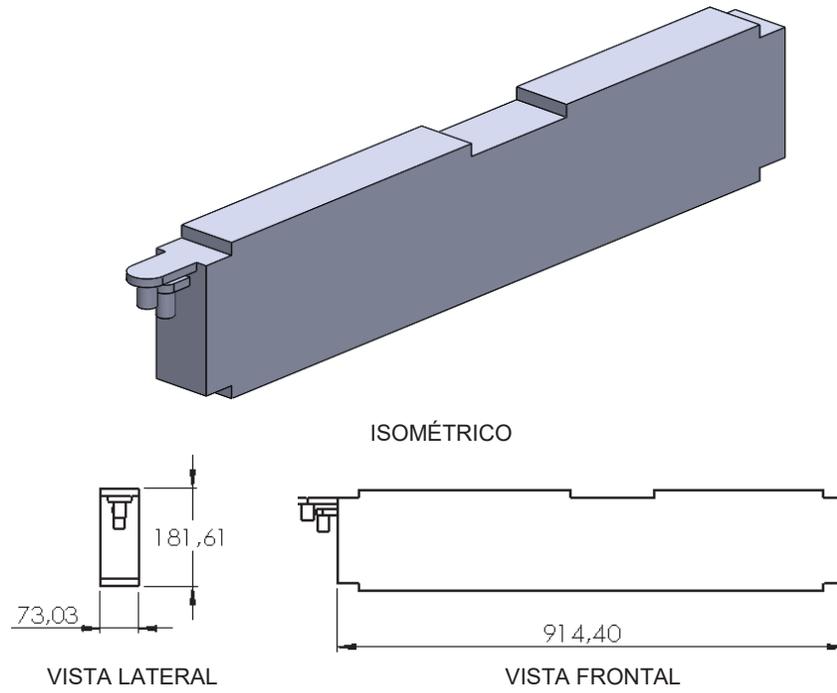
La batería recomendada para alimentar el sistema de transporte terrestre es el modulo Tesla Smart Litio-Ion 18650 para vehículo eléctrico de 57 V y 3 kW/h (ver Figura 23 y Figure 24).

Figura 23. Tesla Smart Lithium Ion 18650 EV Module



Fuente: [15]

Figure 24. Dimensiones básicas de batería



Fuente: adaptada de [15]

CAPÍTULO 4

DISEÑO GEOMÉTRICO DE LLANTA MECANUM, ELEMENTOS Y ACCESORIOS DEL SISTEMA DE ACOPLE.

4.1 INTRODUCCIÓN

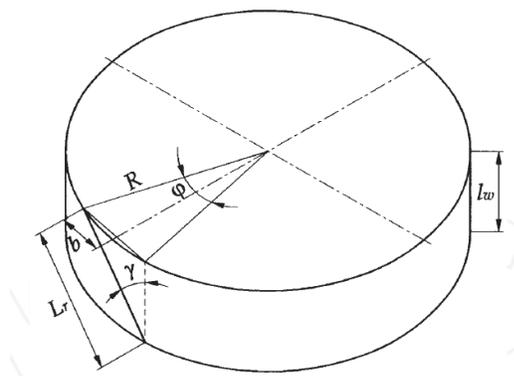
En este capítulo se diseña de forma geométrica la llanta de tecnología Mecanum. El diseño de la llanta se hace conforme a las necesidades del sistema de transporte terrestre tomando en cuenta la altura del chasis y el espacio designado al sistema de tracción, las cuales limitan sus dimensiones. Además, se diseña los componentes de sujeción que acoplan el servomotor y la llanta Mecanum.

4.2 DISEÑO GEOMÉTRICO DE LLANTA MECANUM

La llanta Mecanum consiste en un cubo o núcleo circular que alberga una cantidad de rodillos libres en su periferia, dispuestos en un ángulo de 45° con respecto al eje de rotación. El diseño de los rodillos debe cumplir con la relación de una elipse para demarcar el perfil del mismo [16][17].

4.2.1 Diseño geométrico de cubo o núcleo. Para el diseño del núcleo es necesario tener en cuenta: a) el radio de la llanta, b) el número de rodillos, c) el ancho de la llanta, d) el ángulo de los rodillos con respecto al eje de rotación, y e) la longitud del rodillo (ver Figura 25) [16] [17]. Las dimensiones determinadas por el espacio del sistema de transporte terrestre son: a) el radio $R = 180 \text{ mm}$, b) ancho de la llanta $L_w = 137 \text{ mm}$ y c) ángulo entre el eje de rodillo y el eje de rotación $\gamma = 45^\circ$ [1] (ver Figura 25). Los resultados de los cálculos para determinar las dimensiones del núcleo se encuentran especificados en el anexo A.

Figura 25. Cotas relacionadas a las dimensiones de la llanta Mecanum



Fuente: [17]

Donde:

R : Radio de la llanta

Lw : Ancho de la llanta

Lr : Longitud de eje de rodillo

b : mitad de la longitud proyectada de la longitud de la llanta

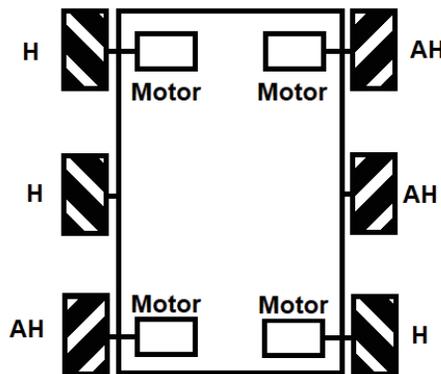
γ : Ángulo entre el eje del rodillo y el eje de rotación

φ : Ángulo comprendido entre los puntos proyectados de la longitud del eje de la llanta

n : número de rodillos

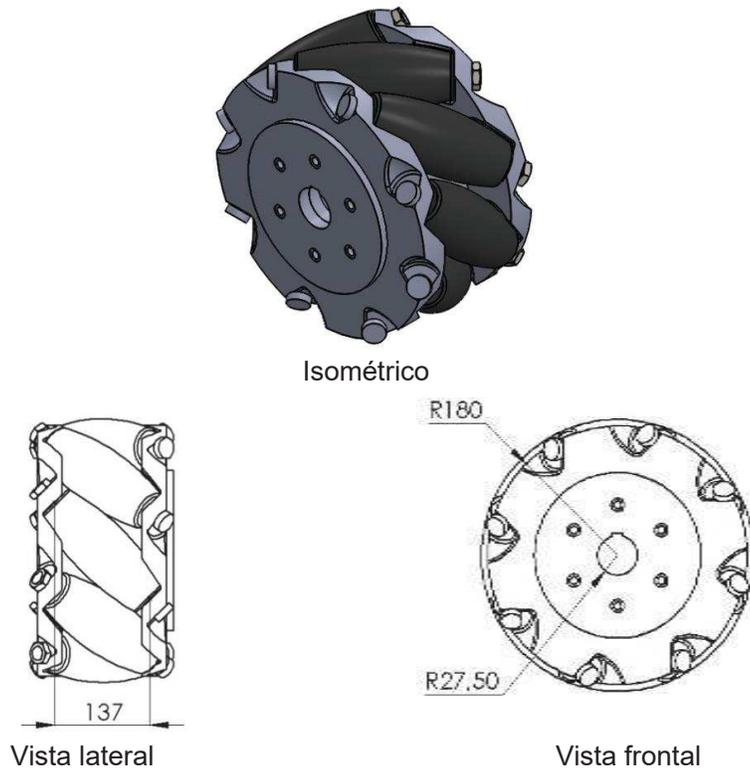
La versatilidad de movimiento es una clara ventaja sobre los sistemas de tracción convencionales. Entre los movimientos que se pueden conseguir con este tipo de llantas se encuentra: a) hacia delante, b) atrás, c) lateral, d) diagonal y e) rotar sobre su propio eje (ver figura en el anexo B). Los cambios en la dirección se logran al cambiar el sentido de giro del servomotor, por tal motivo es necesario ubicar las llantas en una forma específica (ver Figura 26). De lo anterior se puede concluir que se deben diseñar dos llantas mecanum, con los rodillos en sentido horario y la segunda con los rodillos con sentido anti horario (ver Figura 27 y Figura 28).

Figura 26. Ubicación de llantas. rodillos sentido horario (H); rodillos sentido anti-horario (AH)



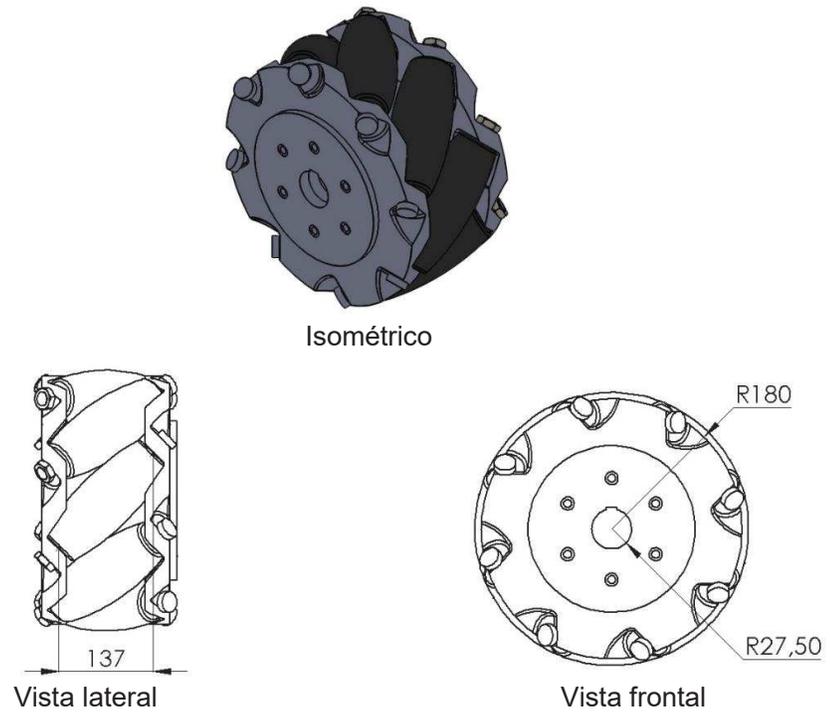
Fuente: adaptada de [17]

Figura 27. Llanta mecanum, rodillos en dirección horaria. (medidas en mm)



Fuente: [3]

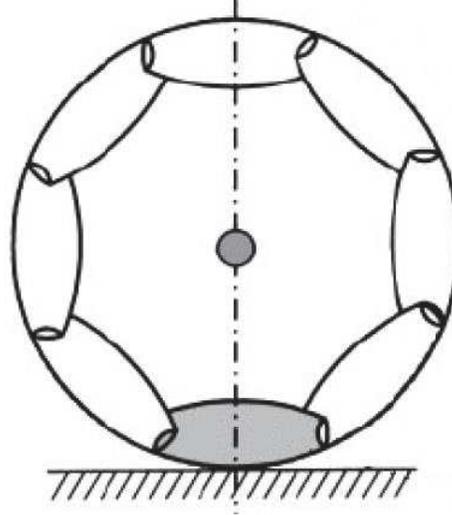
Figura 28. Llanta mecanum, rodillos en sentido anti-horario.(medidas en mm)



Fuente: [3]

4.2.2 Diseño geométrico de rodillo. El perfil del rodillo está delimitado por la ecuación de una elipse, esto con el objetivo de conseguir que al menos 1 de los rodillos siempre estén en contacto con la superficie de movimiento (ver Figura 29).

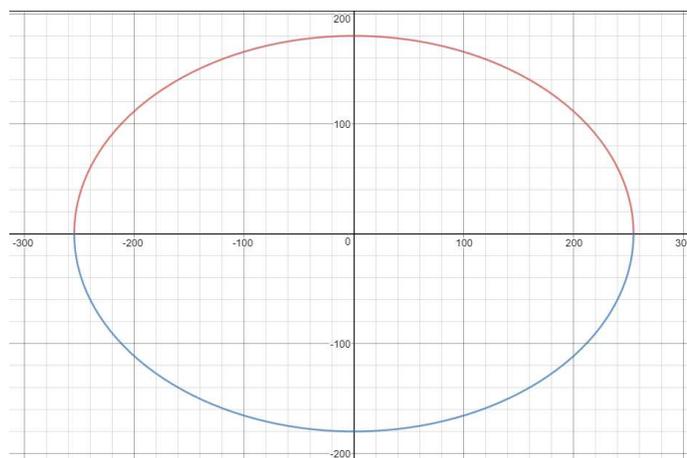
Figura 29. Representación de la silueta formada por los rodillos en la llanta Mecanum



Fuente: [17]

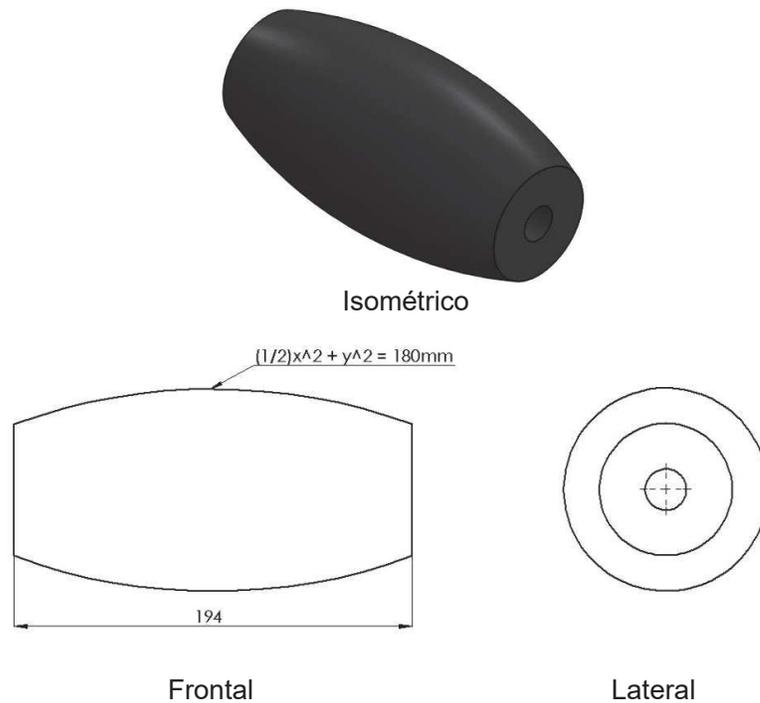
El cálculo para determinar el perfil del rodillo se encuentra en el anexo A. el resultado de este cálculo se puede observar en la Figura 30

Figura 30. elipse perfil del rodillo.



Para el modelado del rodillo se utiliza el software de diseño CAD Solidworks[4] (ver Figura 31), basado en la ecuación para construir el sólido solo es necesario: a) el largo de rodillo (L_r) que tiene como valor $L_r = 194$ mm y b) el perfil de la elipse (ver Figura 30).

Figura 31. Rodillo modelado



4.2.3 Propuesta llanta Mecanum. Se muestra el resultado del diseño para los dos sentidos de rodillos alrededor del núcleo. Se propone el siguiente diseño de llanta Mecanum para el sistema de transporte terrestre con un diseño geométrico simple (ver Figura 32, Figura 32 y Figura 33).

Figura 32. Diseño de llanta Mecanum, sentido anti-horario

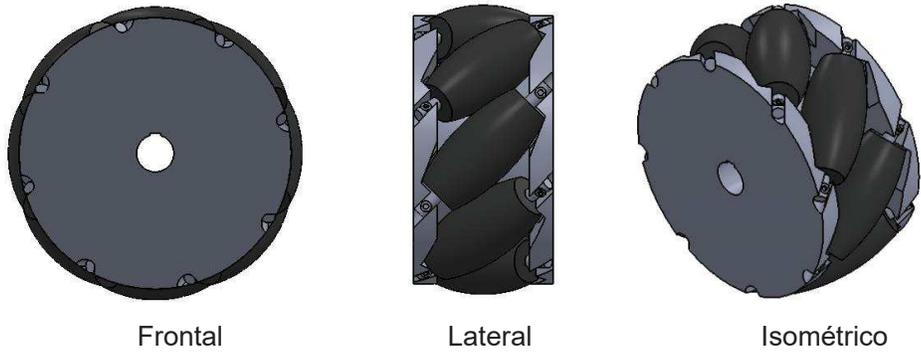


Figura 33. Diseño de llanta mecanum, sentido horario

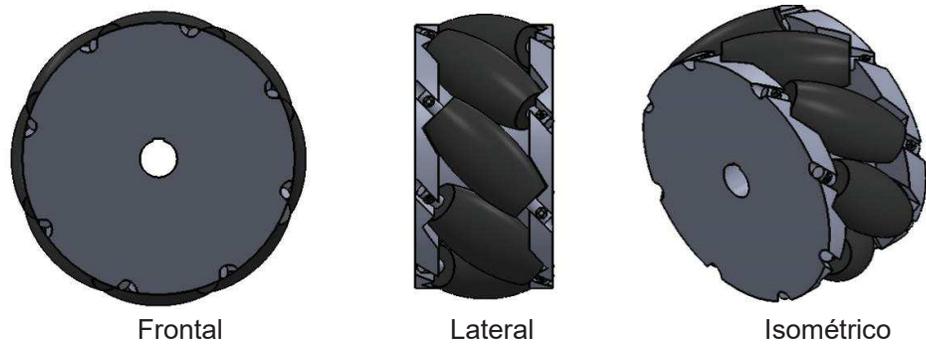
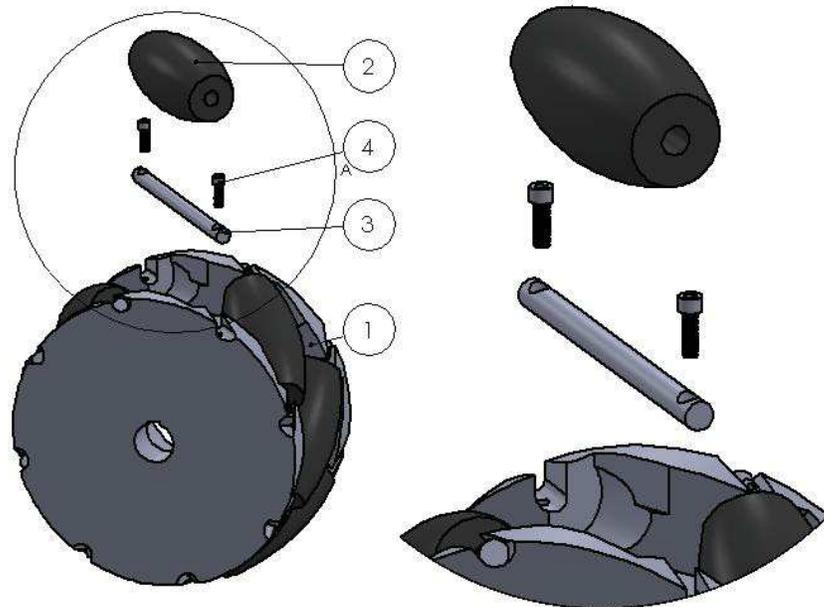


Figura 34. Elementos que conforman el prototipo de llanta mecanum



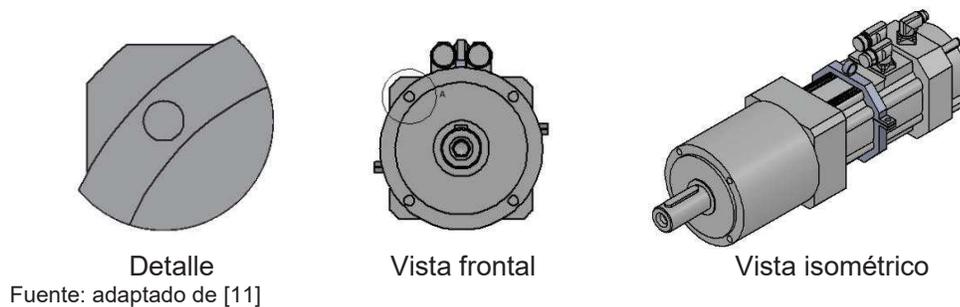
En el Figura 34 se puede observar los elementos que componen la llanta mecanum: (1) núcleo; (2) Rodillo; (3) eje de rodillo; (4) pernos M10

4.3 ACOPLA DEL SISTEMA DE TRACCIÓN.

La llanta Mecanum se debe acoplar al motor y chasis, de forma segura y firme, garantizando la transmisión de potencia y par motor a las 4 llantas. Además, es necesario un sistema de suspensión para minimizar las vibraciones que se puedan presentar a lo largo del espacio designado al interior de la planta de ensamble o las vibraciones a causa de cargas y descargas de los objetos a transportar. A continuación, se presentan los accesorios y soportes que se recomiendan para el acople de la llanta y el servomotor en el sistema de transporte terrestre. Los planos del sistema de transmisión de potencia se encuentran en el anexo C.

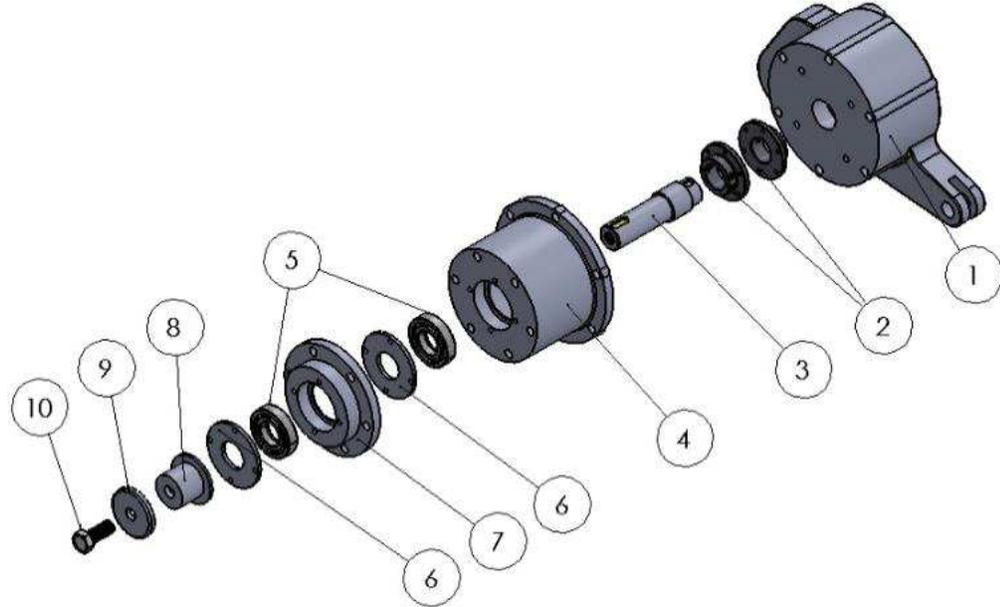
4.3.1 Sujeción servomotores. Para garantizar la firmeza del servomotor, este posee dos sujeciones: a) mediante pernos en la parte frontal (ver Figura 35), que unen al reductor de velocidad con el sistema de acople a la llanta Mecanum y b) un anillo de sujeción por el cual suspende el motor con un cable, esto con el fin de dar una libertad de movimiento[11].

Figura 35. detalle de sujeción por pernos de 10mm



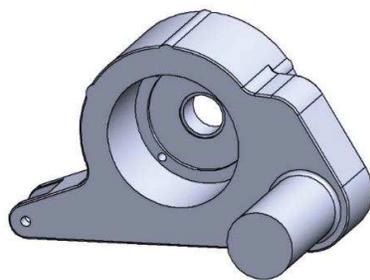
4.3.2 Sistema de acople. Este sistema compuesto por diferentes elementos entre los cuales se destacan: a)acople principal, b) árbol de transmisión potencia y c) soportes (ver Figura 36). estructura que tiene como propósito, acoplar la caja reductora con la llanta Mecanum y servir como un soporte para árbol de transmisión de potencia desde la caja reductora a la llanta Mecanum. Como objetivo secundario, esta estructura sirve como base de la suspensión(ver Figura 37).

Figura 36. Elementos de sistema de acople

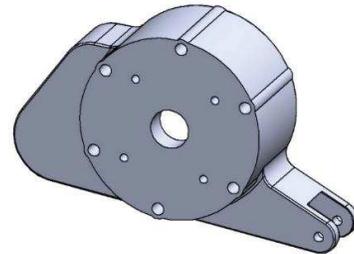


.Los componentes del sistema de acople son: (1) acople principal; (2) acople de eje; (3) árbol de transmisión de potencia; (4) soporte mayor; (5) rodamientos NUP208; (6) tapa de apoyo para rodamiento; (7) soporte menor; (8) buje de acoplamiento de llanta Mecanum; (9) arandela; (10) perno de sujeción

Figura 37. acople principal



Vista dimétrica derecha

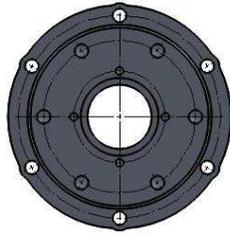


Vista dimétrica izquierda

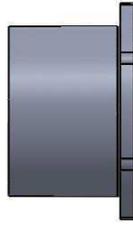
Fuente: [1]

Los soportes son elemento diseñados para dar rigidez al mecanismo de acople; en ellos se alberga el árbol de transmisión de potencia(ver Figura 40), el acople entre árboles y los rodamientos NUP208(ver Figura 36). Estos soportes son unidos mediante pernos M14 (ver Figura 38 y Figura 39) y las tapas de apoyo para rodamiento(ver Figura 36) son necesarias para mantener en su lugar los rodamientos.

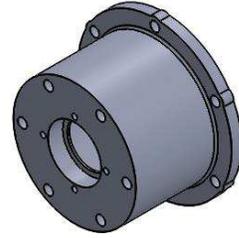
Figura 38. Soporte mayor



Vista frontal

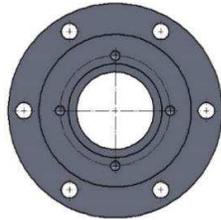


Vista lateral



Vista isométrico

Figura 39. Soporte menor



Vista frontal

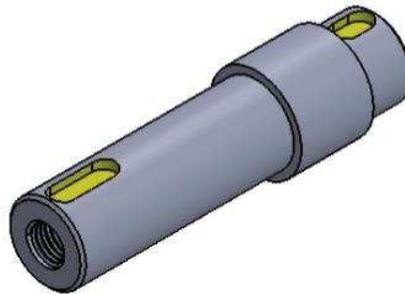


Vista lateral

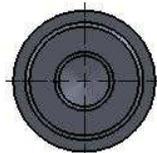


Vista isométrico

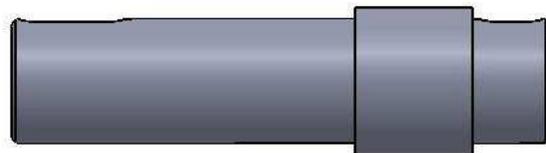
Figura 40. Árbol de transmisión de potencia y par motor



Vista isométrico



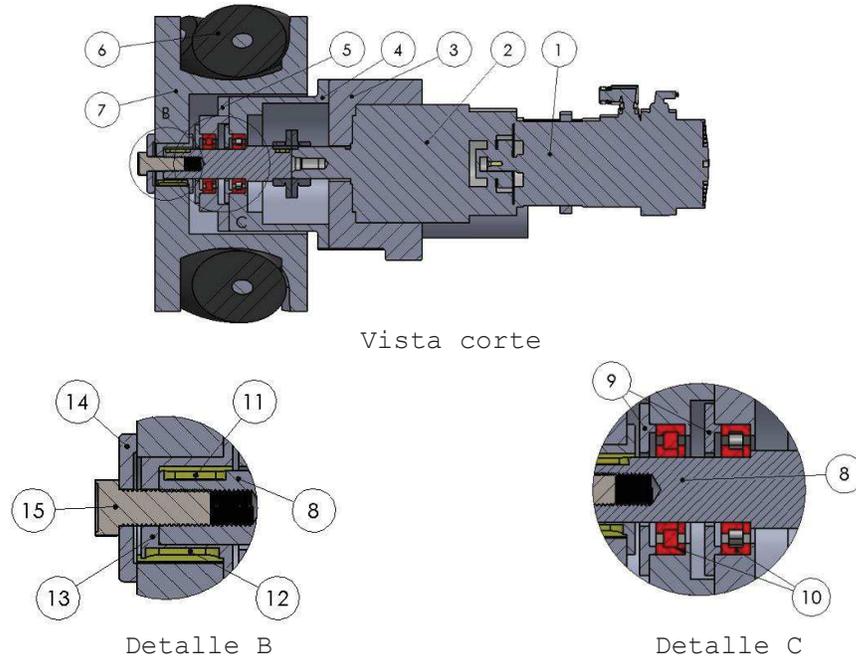
Vista frontal



Vista lateral

4.3.3 Sujeción de llanta Mecanum. Esta sujeción consiste en un perno que une un buje y arandela, los cuales abrazan el núcleo de la llanta Mecanum para mantenerla en su posición. La transmisión de potencia y par motor se efectuar desde el árbol de transmisión por medio de chavetas ubicadas en el buje de acoplamiento (ver Figura 41).

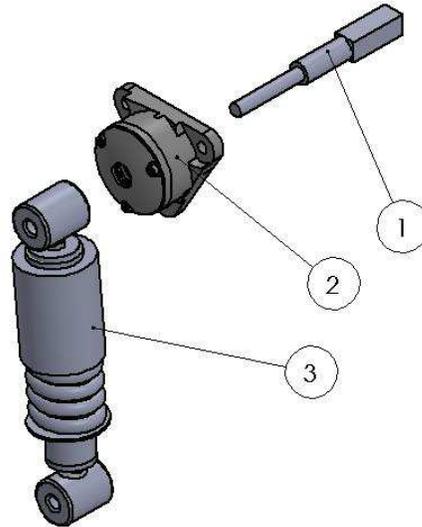
Figura 41. Corte del sistema de tracción



Los elementos del sistema transmisión de potencia: (1) Servomotor; (2) caja reductora axial; (3) acople principal; (4) soporte mayor; (5) Soporte menor; (6) rodillo; (7) cubo o núcleo; (8) árbol de transmisión de potencia; (9) tapas soporte de rodamientos; (10) Rodamientos NUP208; (11) Chavetero entre árbol y buje; (12) chavetero entre buje y núcleo; (13) buje de acoplamiento; (14) arandela; (15) perno de sujeción.

4.3.4 Amortiguador y chumacera secundaria. Sistema de suspensión está compuesto por: a) chumacera principal, b) chumacera secundaria, c) amortiguador, d) un eje que soporta el amortiguador y e) el acople principal (ver Figura 42). Este mecanismo tiene como objetivo, reducir las vibraciones debido a desniveles del terreno o por la carga y descarga de los componen a soportar por el sistema de transporte terrestre [1].

Figura 42. mecanismo de suspensión

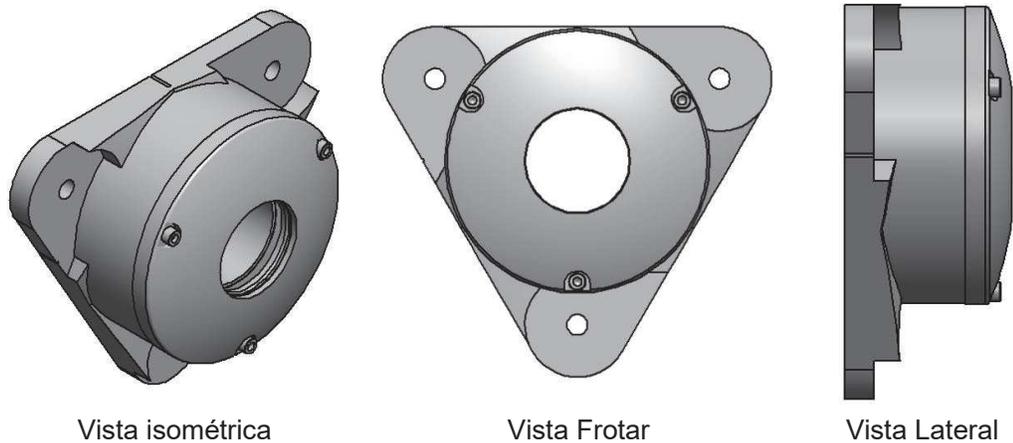


Fuente: [1]

Los elementos que sujetan el amortiguador en la parte superior son: (1) eje de soporte; (2) chumacera secundaria; (3) amortiguador.

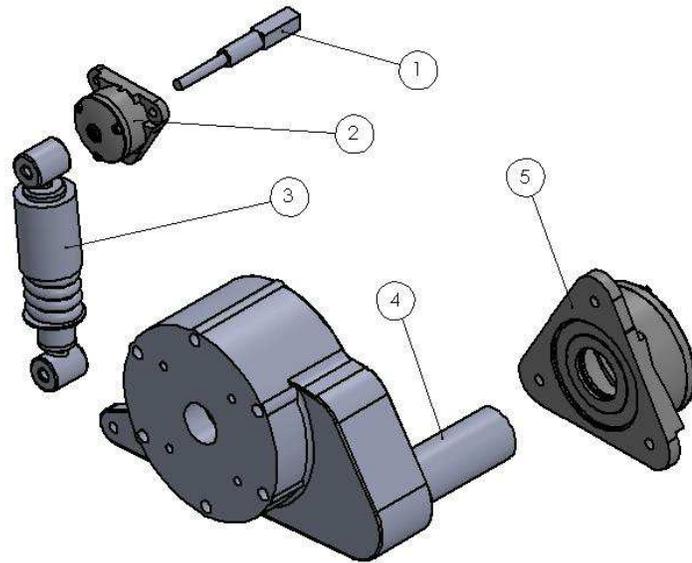
4.3.5 Chumacera principal. Este elemento es importante para el sistema de suspensión, es el encargado de servir de apoyo y además permitir el movimiento de rotación del acople principal; esto con el fin de minimizar las vibraciones del sistema de transporte terrestre (ver Figura 43 y Figura 44) [1].

Figura 43. chumacera principal.



Fuente: [1]

Figura 44. Sistema de suspensión



Fuente: [1]

Los elementos que componen el sistema de suspensión son: (1) eje de soporte; (2) chumacera secundaria; (3) amortiguador; (4) acople principal; (5) chumacera principal.

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN PARA DIFERENTES ELEMENTOS DE EL SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE.

5.1 INTRODUCCIÓN

las simulaciones de los elementos críticos del sistema de tracción se realizan con base en a los datos calculados en el capítulo 2 y el modelado CAD de estos elementos en el capítulo 3. Con ayuda de una herramienta conocida como Static Structural del software ANSYS [18] el cual permite simular situaciones de carga complejas sobre los elementos a analizar en condiciones de frontera determinadas.

Para realizar el estudio mecánico es necesario generar un mallado que pueda adaptarse a la geometría de la pieza; usando el método para generación de malla adaptativo, el cual permite tener control sobre el tamaño del elemento generado y su posterior parametrización. Para lo cual se realiza un análisis de independencia de malla el cual entrega una relación entre el tamaño de elemento en la malla y el esfuerzo sufrido por el componente, esto con la finalidad de determinar el tamaño óptimo del elemento en la malla para obtener resultados más ajustados a la realidad con los mínimos recursos computacionales.

Las condiciones necesarias para el estudio mecánico, se llaman condiciones de frontera, las cuales limitan el comportamiento del componente en los movimientos direccionales y/o rotacionales, resistencia y deformación. Las tres condiciones de frontera son: a) el material del árbol, b) los soportes o apoyos y c) las cargas a las cuales se somete el componente analizado.

5.2 ELEMENTOS CRÍTICOS

Los elementos seleccionados para este estudio mecánico son aquellos que están altamente cargados y representan un papel importante para el adecuado funcionamiento del sistema de tracción y transmisión de potencia, estos elementos son: a) el árbol de transmisión de potencia, b) eje de rodillo y c) el núcleo o cubo (ver Figura 45, Figura 46 y Figura 47).

Figura 45. Árbol de transmisión

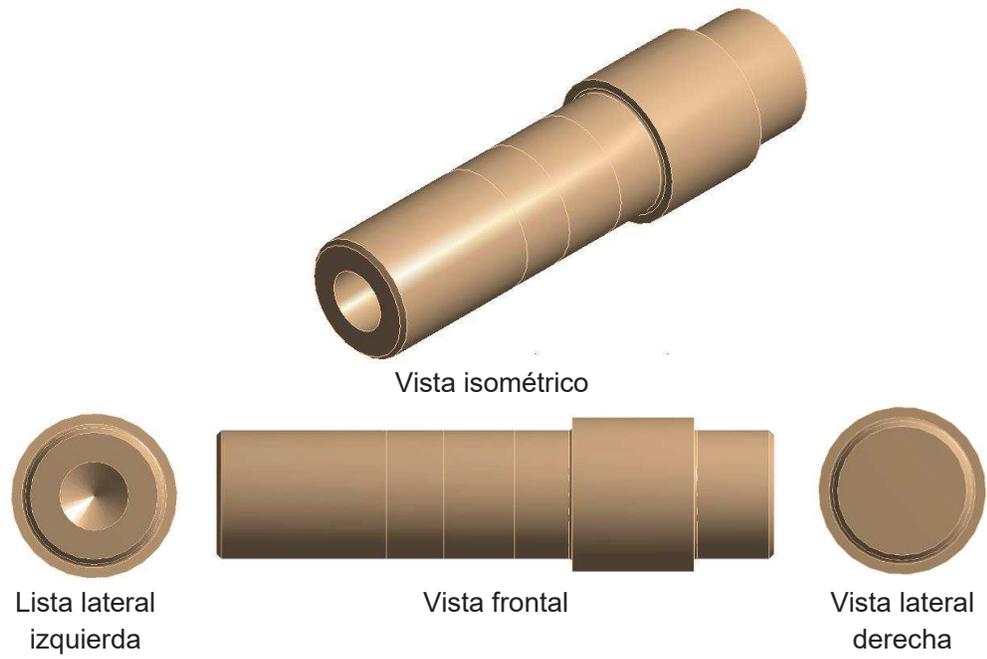


Figura 46. Eje de rodillo

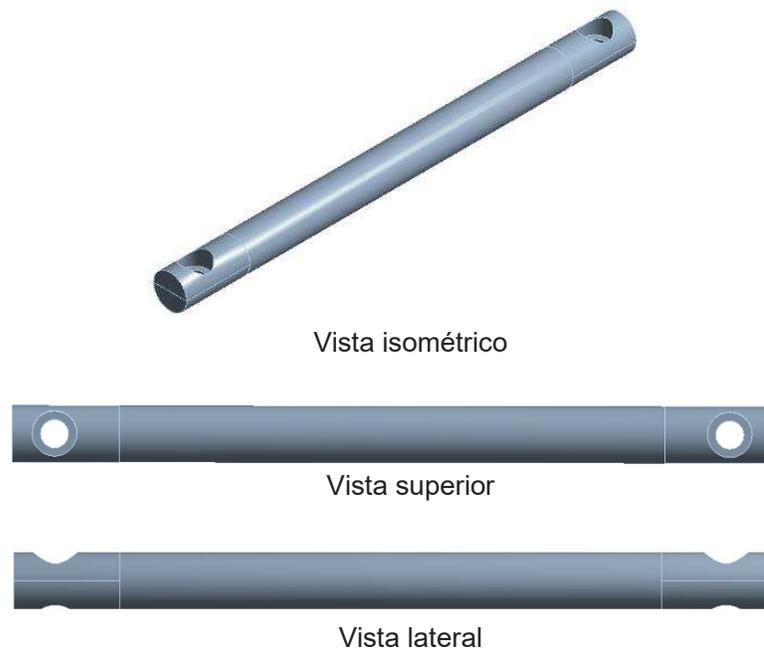
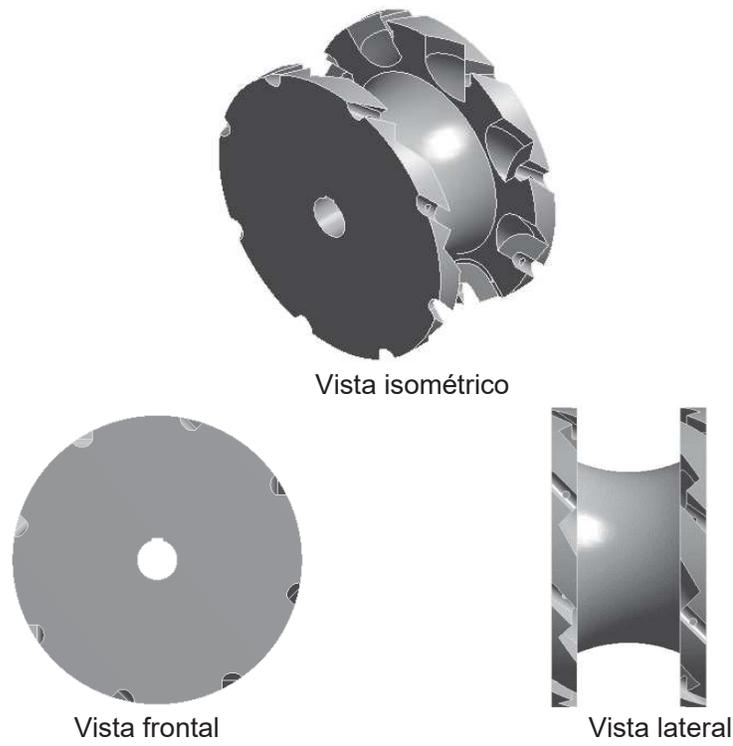


Figura 47. Núcleo o cubo de llanta mecanum

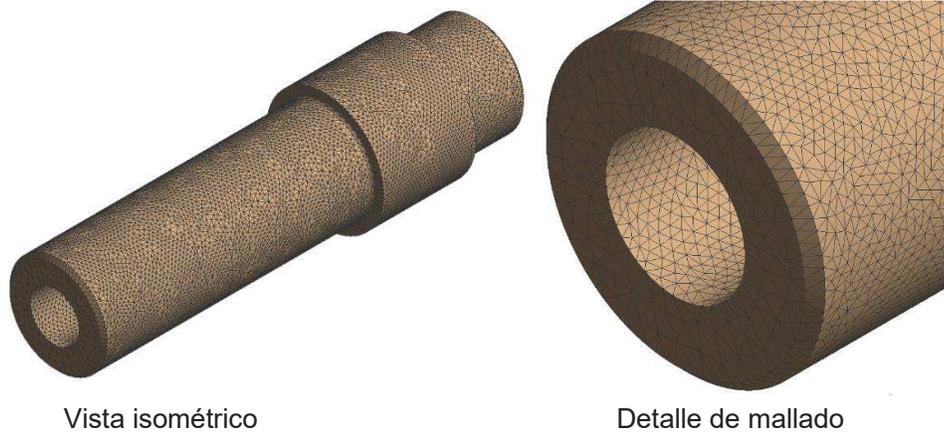


5.3 ÁRBOL DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Elemento que tiene como función transmitir la potencia y el par motor desde la caja reductora, la cual esta acoplada al servomotor y a la llanta mecanum. Este elemento se somete a esfuerzos torsionales, por cizalladura en los apoyos y soportar la fuerza debido al peso del sistema de transporte terrestre con carga debido al motor PW308C, condiciones que lo comprometen como elemento crítico en el sistema de tracción (ver Figura 45).

5.3.1 Mallado del árbol de transmisión. Se observa el mallado realizado al árbol de transmisión, por medio del método de generación de malla adaptativo. Se destaca que el chavetero y la rosca con los cuales se modelaron el árbol de transmisión, se suprimieron debido a que no sufren esfuerzos críticos. Además, la carga computacional que estos agregan, supera la capacidad de los equipos disponibles.

Figura 48. Mallado en el árbol de transmisión



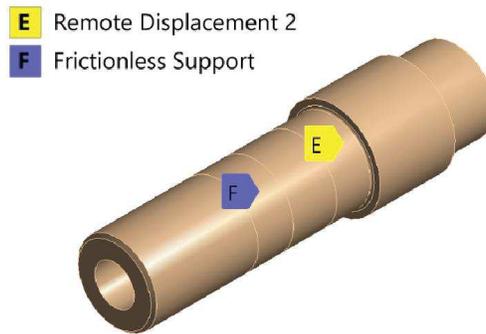
5.3.2 Condiciones de frontera. A continuación, se describe las condiciones de frontera para el árbol de transmisión.

5.3.2.1 Material del árbol de transmisión el material seleccionado para la modelación y simulación del árbol de transmisión, es el acero AISI/SAE 4340 recocido el cual posee una curva lineal de esfuerzo contra deformación y posee las mismas propiedades cualquier dirección del material (isotrópico) [19] [20]. Las propiedades mecánicas del material son [21]:

- Densidad: 7800 – 7900 kg/m³
- Módulo de Young: 205 – 213 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0,285 – 0,295
- Limite elástico: 420 – 525 MPa
- Esfuerzo ultimo a la tensión: 670 – 820 MPa
- Esfuerzo ultimo a la compresión: 420 – 525 MPa

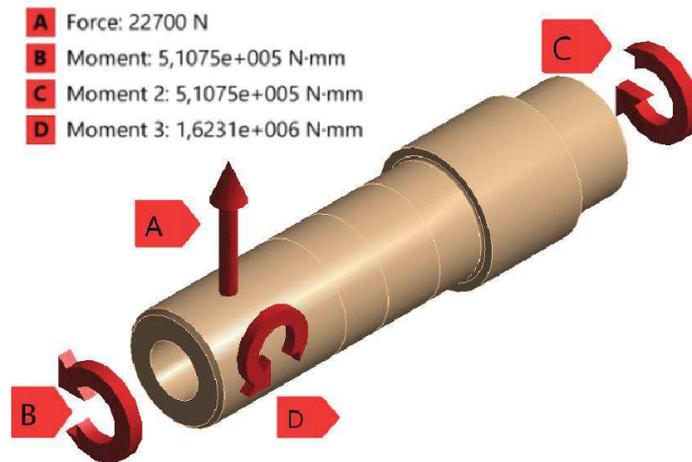
5.3.2.2 Soportes del árbol de transmisión. Los soportes en el árbol de transmisión (ver figura 42), son una limitante para los grados de libertad es árbol de transmisión de potencia. Para la definición de ambos es necesario tomar en cuenta los grados de libertad a los que está sujeto el árbol apoyado en los dos rodamientos.

Figura 49. Ubicación de los soportes



5.3.2.3 Cargas sobre el árbol. Las cargas que soporta sobre el árbol de transmisión son: a) reacción sobre la llanta, b) reacción de torsión debido a la acción del servomotor, c) torsional debido a la acción del servomotor sobre el árbol y d) momento flector debido a la excentricidad de la reacción (ver Figura 50).

Figura 50. Representación de las cargas sobre el árbol de transmisión



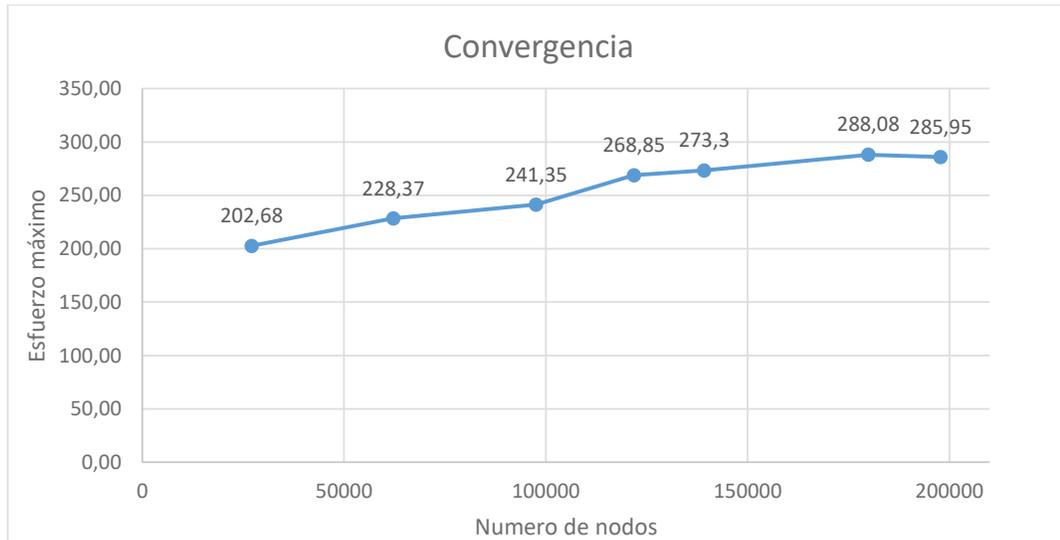
5.3.3 Análisis de independencia de malla. Este análisis se realiza parametrizando el tamaño del elemento en la malla, el esfuerzo equivalente a Von Mises y el número de nodos generados en la malla. A continuación, se determina mediante ANSYS la convergencia del esfuerzo en función del número de nodos. Los resultados de este análisis se encuentran en la Tabla 16.

Tabla 16. Análisis de independencia de malla

Árbol de transmisión			
Tamaño del elemento	Numero de nodo	Esfuerzo máximo	Error
mm		MPa	%
3,00	27090	202,68	12,675
2,00	62194	228,37	5,684
1,6	97575	241,35	11,394
1,45	121840	268,85	1,655
1,35	139232	273,3	5,408
1,20	179890	288,08	0,739
1,15	197796	285,95	0

El error relativo más bajo es de 0,739% perteneciente al tamaño de del elemento de 1,20 mm. El cálculo del error relativo se especifica en el anexo A. la curva de convergencia muestra con claridad la tendencia del esfuerzo sobre el árbol de transmisión de potencia (ver Figura 51).

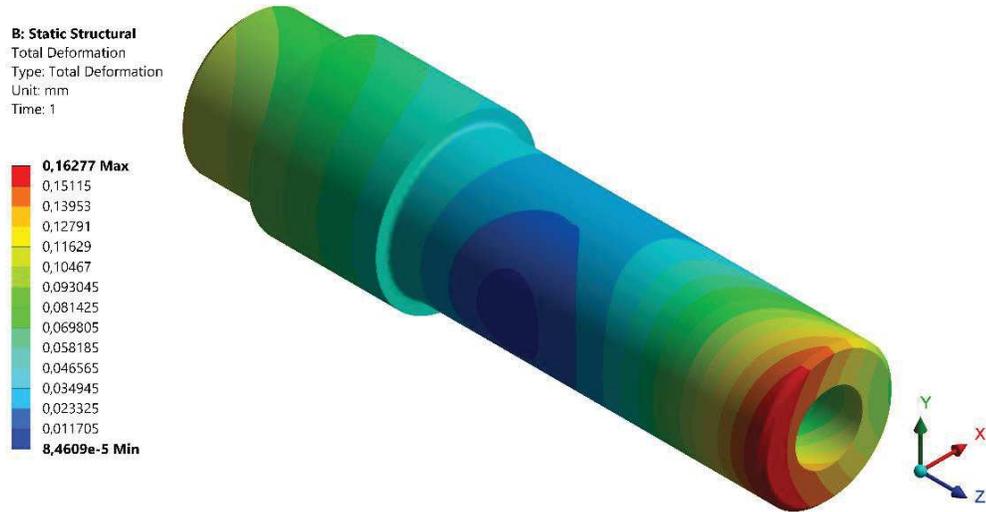
Figura 51. Grafica de convergencia



5.3.4 Resultado de simulación. Se presenta los resultados de deformación, esfuerzo máximo equivalente a Von mises y el factor de seguridad calculados por el software de simulación ANSYS.[18]

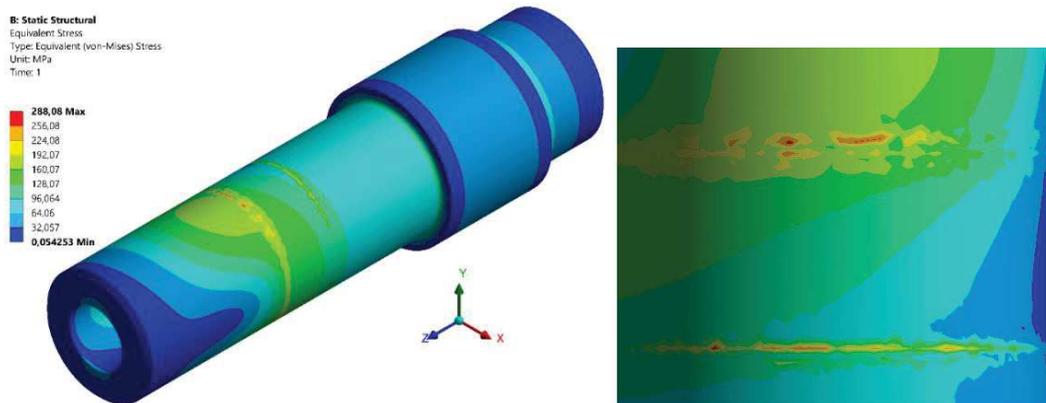
5.3.4.1 deformación total. En la Figura 52 se muestran las deformaciones, a lo largo del árbol de transmisión con un valor máximo de 0,163 mm.

Figura 52. Deformación total en el árbol de transmisión



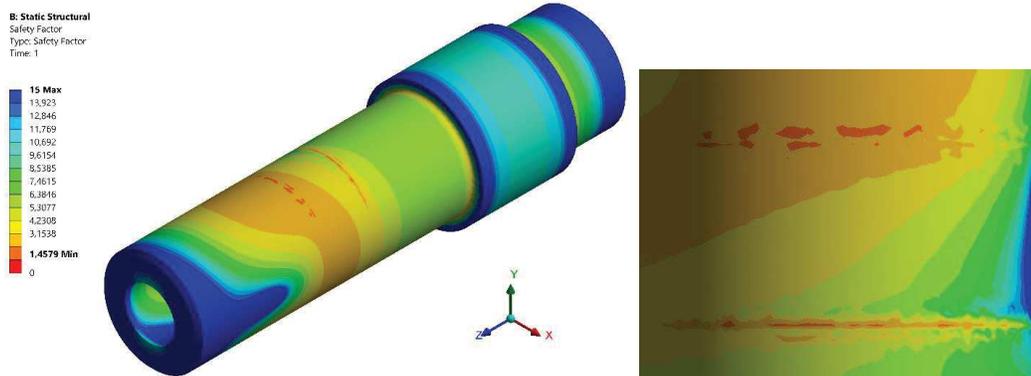
5.3.4.2 Esfuerzo máximo. En la Figura 53 se muestra el esfuerzo máximo equivalente a Von Mises, el cual tiene como valor de 288,08 MPa.

Figura 53. Esfuerzo máximo sobre el árbol de transmisión



5.3.4.3 Factor de seguridad. La Figure 54 muestra el factor de seguridad crítico en el árbol de transmisión, el cual tiene como valor de 1,4579.

Figure 54. Factor de seguridad del árbol de transmisión

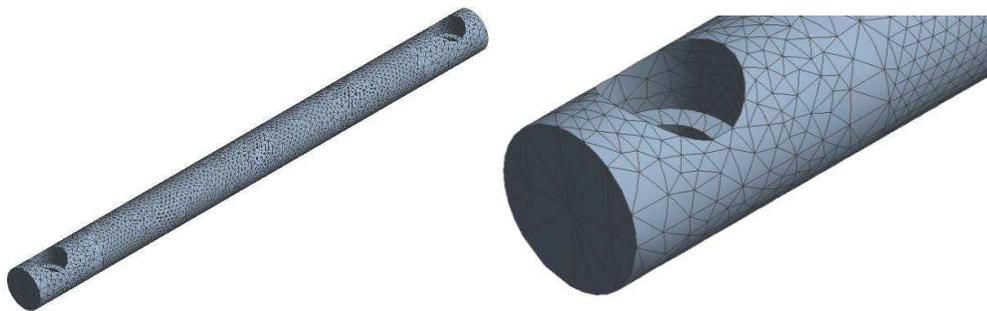


5.4 EJE DEI RODILLO

Este eje tiene el objetivo de servir como apoyo al rodillo de la llanta mecanum (ver Figura 34). Soporta directamente la reacción de la llanta de forma distribuida a lo largo del rodillo, por lo que este elemento se ve forzado a resistir altos niveles de carga con un diámetro de la sección transversal de 20 mm, debido a estas condiciones, este elemento se considera como crítico en el sistema de tracción(ver Figura 46).

5.4.1 Mallado de eje de rodillo. el mallado en el eje de rodillo se generó con el método adaptativo; este mallado se realizó con un tamaño de elemento de 2 mm (ver Figura 55).

Figura 55. Mallado de eje de rodillo



5.4.2 Condiciones de frontera. A continuación, se describe las condiciones de frontera para el eje de rodillo.

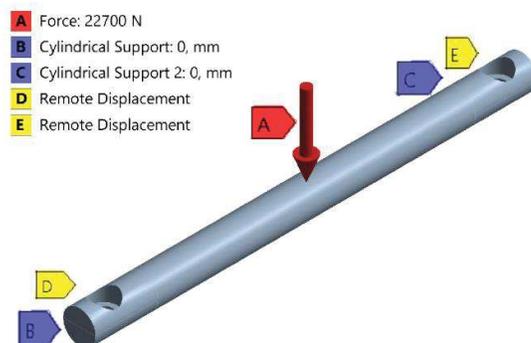
5.4.2.1 Material del eje de rodillo el material seleccionado para la modelación y simulación del eje de rodillo, es el acero AISI/SAE 4340 templado en aceite a 205°C, cual posee una curva lineal de esfuerzo contra deformación y posee las mismas propiedades cualquier dirección del material (isotrópico) [19]. Las propiedades mecánicas del material son [21]:

- Densidad: 7800 – 7900 kg/m³
- Módulo de Young: 205 – 213 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0,285 – 0,295
- Limite elástico: 1510 – 1850 MPa
- Esfuerzo ultimo a la tensión: 1580 – 2070 MPa
- Esfuerzo ultimo a la compresión: 1510 – 1850 MPa

5.4.2.2 Soportes del eje de rodillo. Este eje rodillo encaja en la periferia del núcleo y asegurado en el mismo por medio de pernos situados en sus extremos, como se ve en la Figura 34. Para la definición de estos soportes se restringe el movimiento en las superficies del eje que tienen contacto con el núcleo, además también se restringen movimiento colocando soportes en los agujeros para los pernos (ver Figura 56).

5.4.2.3 Cargas sobre el eje de rodillo. La carga soportada por el eje de rodillo, es la reacción que existe en la llanta bajo condiciones normales, pero, se transfiere al eje como una carga distribuida a lo largo del rodillo (Figura 56).

Figura 56. Cargas y soportes en el eje del rodillo



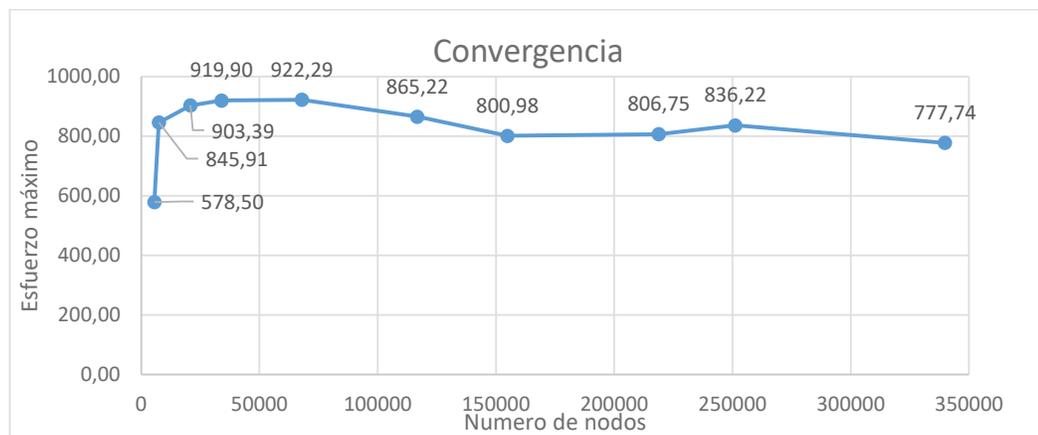
5.4.3 Análisis de independencia de malla. El análisis de independencia de malla para el eje del rodillo es calculado parametrizando el tamaño del elemento en la malla, el esfuerzo máximo y el número de nodos.

Tabla 17. Análisis de independencia de malla

Eje de rodillo			
Tamaño del elemento	Numero de nodo	Esfuerzo máximo	Error
mm		MPa	%
5	5587	578,50	46,225
4	7495	845,91	6,796
2,5	20869	903,39	1,827
2	33954	919,90	0,260
1,4	67969	922,29	6,188
1,1	116739	865,22	7,425
0,95	154835	800,98	0,720
0,8	218799	806,75	3,653
0,75	251193	836,22	6,993
0,65	339864	777,74	0

El error relativo más bajo es de 0,33% perteneciente al tamaño de del elemento de 0,95 mm; El cálculo del error relativo se especifica en el anexo A. la curva de convergencia muestra con claridad la tendencia del esfuerzo sobre el eje del rodillo (ver Figura 57).

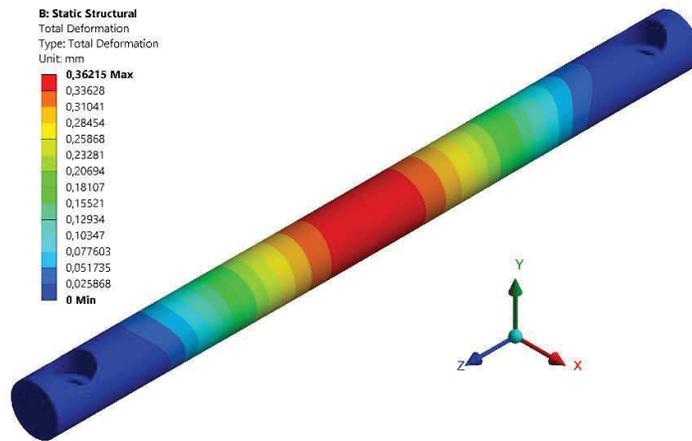
Figura 57. Grafica de convergencia de malla



5.4.4 Resultados de simulación. Se presenta los resultados de deformación, esfuerzo máximo equivalente a Von mises y el factor de seguridad calculados por el software de simulación ANSYS [18].

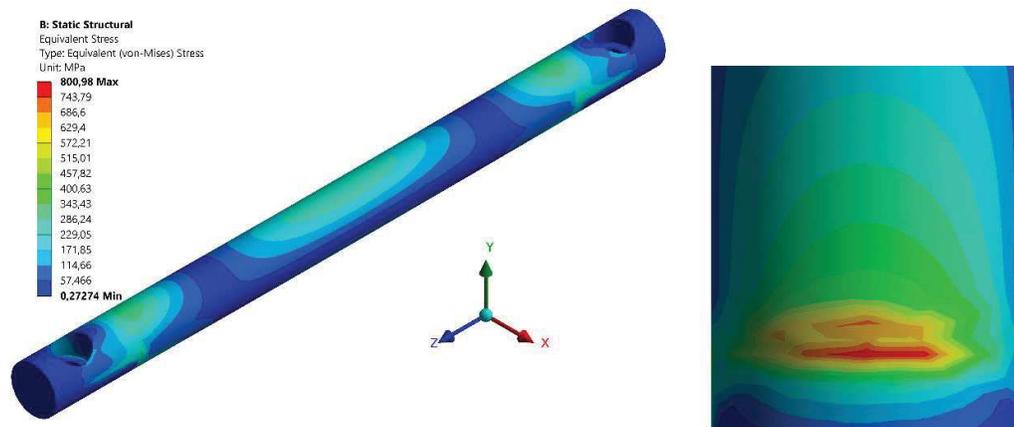
5.4.4.1 Deformación total. En la Figura 58 se muestran las deformaciones, a lo largo del eje del rodillo con un valor máximo de 0,36 mm.

Figura 58. Deformación total del eje de rodillo



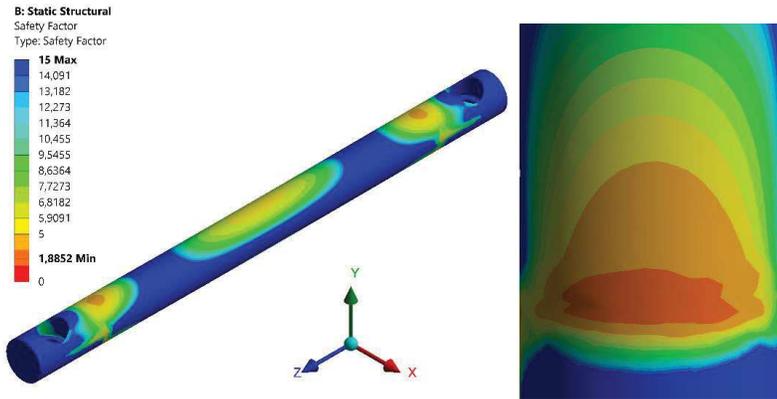
5.4.4.2 Esfuerzo máximo. En la Figura 59 se muestra el esfuerzo máximo equivalente a Von Mises, el cual tiene el máximo valor de 800,98 MPa.

Figura 59. esfuerzo máximo. Vista isométrico



5.4.4.3 Factor de seguridad. La Figura 60 muestra el factor de seguridad crítico en el eje del rodillo, el cual tiene llega a un valor de 1,8852.

Figura 60. Factor de seguridad presente en el eje del rodillo

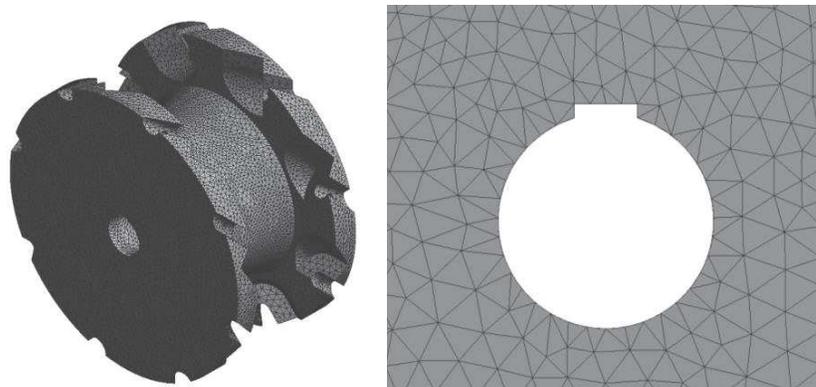


5.5 NÚCLEO O CUBO

Elemento principal de la llanta mecanum que alberga en su periferia los rodillos, y se acopla al eje de transmisión. Este elemento debe soportar la reacción debido al peso del sistema de transporte terrestre y su carga en condiciones normales; por lo tanto, se considera como un elemento crítico en el sistema de tracción.

5.5.1 Mallado del núcleo. El mallado del núcleo es generado mediante el método adaptativo que ofrece la herramienta de ANSYS; el mallado se realizó con un tamaño de elemento de 5 mm (Figura 61).

Figura 61. Mallado del núcleo



5.5.2 Condiciones de frontera. A continuación, se describe las condiciones de frontera para el núcleo.

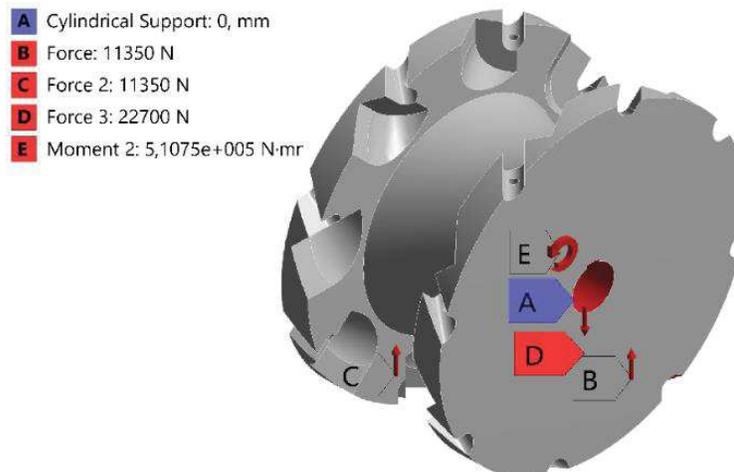
5.5.2.1 Material del núcleo. El material seleccionado para la modelación y simulación del núcleo de, es el aluminio EN AC-48000 con tratamiento térmico T6 y envejecimiento artificial. Es un material liviano y muy resistente, el cual posee una curva lineal de esfuerzo contra deformación y posee las mismas propiedades cualquier dirección del material (isotrópico) [19]. Las propiedades mecánicas del material son [21]:

- Densidad: 2650 – 2710 kg/m³
- Módulo de Young: 70,6 – 73,4 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0,322 – 0,338
- Límite elástico: 234 – 258 MPa
- Esfuerzo ultimo a la tensión: 266 – 294 MPa
- Esfuerzo ultimo a la compresión: 228 – 252 MPa

5.5.2.2 Soportes del núcleo. El núcleo la forma de sujeción es el orificio en el cual se sujeta mediante un perno, una arandela y un buje. Esta sujeción limita los grados de libertad (ver Figura 62).

5.5.2.3 Sargas sobre el núcleo. Las cargas soportadas por el núcleo, son debido a la torsión que el servomotor ejerce sobre él y la reacción de debido al peso del sistema de transporte terrestre y los equipos a soportar (ver Figura 62).

Figura 62. Cargas y soportes del núcleo



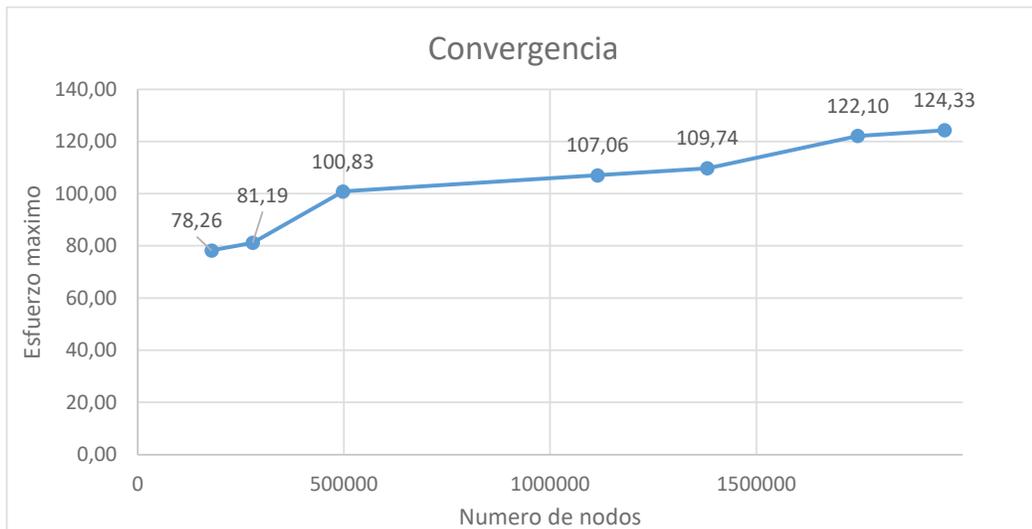
5.5.3 Análisis de independencia de malla. El análisis de independencia de malla para el núcleo es calculado parametrizando el tamaño del elemento en la malla, el esfuerzo máximo y el número de nodos.

Tabla 18. Análisis de independencia de malla

Núcleo			
Tamaño del elemento	Numero de nodo	Esfuerzo máximo	Error
mm		MPa	%
5	179464	78,26	3,737
4	278725	81,19	24,189
3	498018	100,83	6,178
2	1114938	107,06	2,510
1,8	1381349	109,74	11,263
1,6	1746254	122,10	1,821
1,5	1956331	124,33	0

El error relativo más bajo es de 1,28% perteneciente al tamaño de del elemento de 1,6 mm. El cálculo del error relativo se especifica en el anexo A. la curva de convergencia muestra con claridad la tendencia del esfuerzo sobre el núcleo (ver Figura 63).

Figura 63. Grafica de convergencia de malla



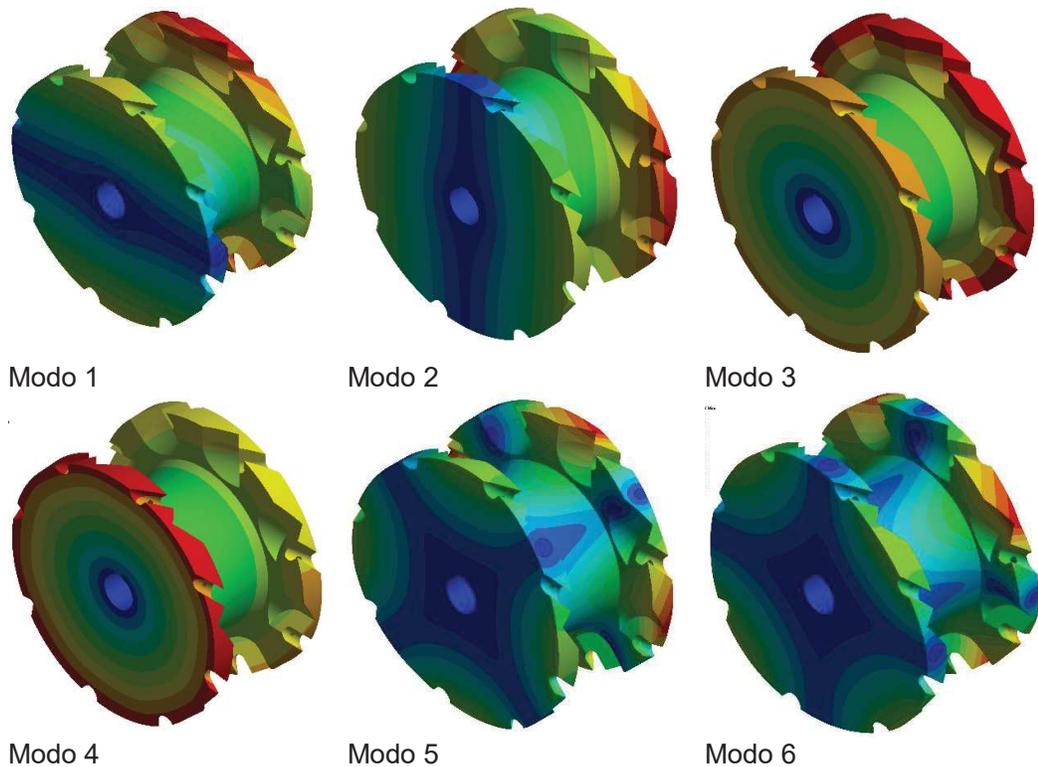
5.5.4 Análisis modal. Es un proceso por el cual una estructura u elemento sometido a cargas dinámicas, es analizado para determinar parámetros modales como lo son la frecuencia, el amortiguamiento y los modos de vibración, los cuales dependen de la masa y la rigidez de la estructura o elemento [22] [23]. Este análisis tiene el objetivo determinar los modos de vibración del núcleo, y así establecer si la llanta mecanum puede entrar en resonancia con una velocidad de 3 km/h.

Los resultados de modos de vibración y las deformaciones (ver Figura 64) del núcleo calculados con el software de simulación ANSYS [18], se describen en la Tabla 19.

Tabla 19. Modos de vibración y deformación

Modos	Frecuencia [Hz]	Revoluciones por minuto [RPM]	Deformación [mm]
1	558,58	33514,8	13,015
2	573,89	34433,4	12,914
3	807,57	48454,2	9,4371
4	1305,5	78330	10,619
5	1942,9	116574	18,905
6	1943,4	116604	18,842

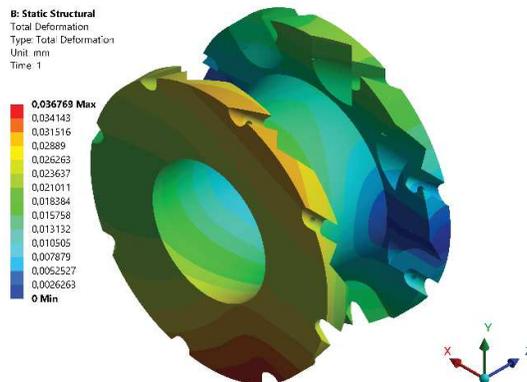
Figura 64. Deformaciones en el núcleo debido cada modo



5.5.5 Resultados de simulación. Se presenta los resultados de deformación, esfuerzo máximo equivalente a Von mises y el factor de seguridad calculados por el software de simulación ANSYS.[18]

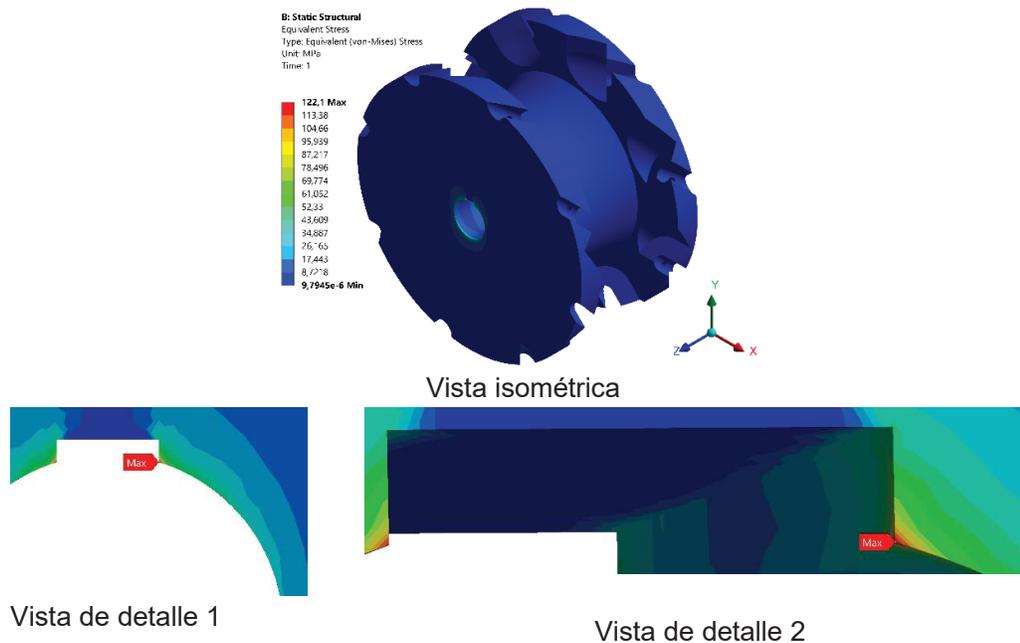
5.5.5.1 Deformación total. En la Figura 65 se muestran las deformaciones a sufridas por el núcleo con un valor máximo de 0,034 mm.

Figura 65. Deformación presente en el núcleo



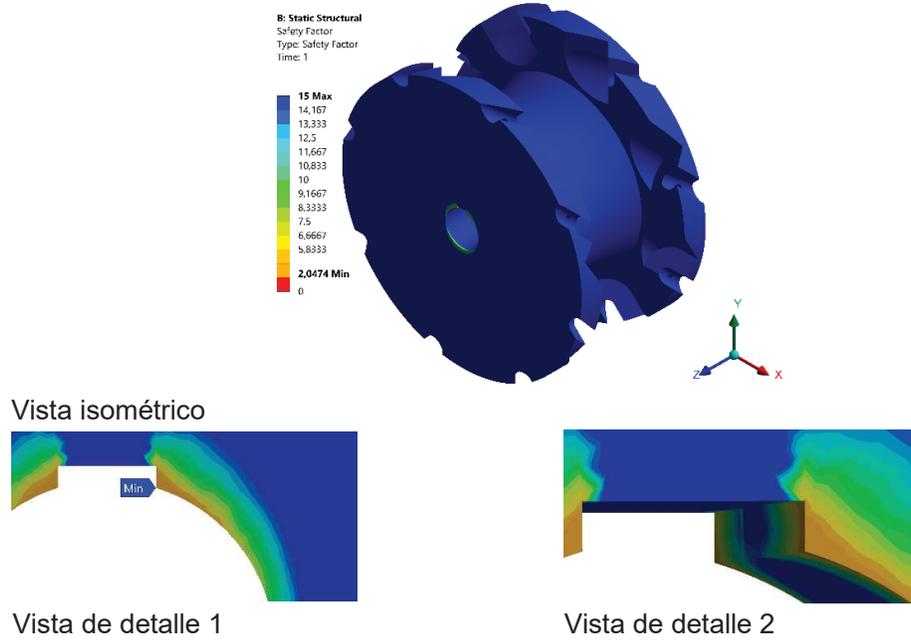
5.5.5.2 Esfuerzo máximo. En la Figura 66 se muestra el esfuerzo máximo equivalente a Von Mises, el cual tiene como valor de 121,1 MPa.

Figura 66. Esfuerzo máximo en el núcleo



5.5.5.3 Factor de seguridad. Las Figura 67 muestra el factor de seguridad crítico en el eje de transmisión, el cual tiene como valor de 2,0474.

Figura 67. factor de seguridad en el núcleo



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES APORTES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

El servomotor seleccionado tiene la capacidad para cumplir con las necesidades del sistema de transporte terrestre en condiciones normales de carga, en donde el peso del motor PW308C es soportado por los cuatro módulos de elevación.

Los resultados de potencia y par motor en condiciones similares de carga y velocidad, evidencian que las llantas Mecanum tiene un bajo consumo de energía, comparada con las llantas omnidireccionales.

Se realizó un diseño geométrico de la llanta mecanum; de la cual se pudo comprobar la integridad estructural de algunos elementos críticos de la misma utilizando herramientas computacionales, logrando validar la integridad estructural de las piezas.

Se pudo comprobar mediante el análisis modal del núcleo, que todo el conjunto de frecuencias resonantes que se obtuvieron en el proceso, la llanta mecanum jamás conseguirá alcanzar las velocidades angulares que pongan en riesgo la integridad estructural del sistema de transmisión de potencia o del sistema de transporte terrestre por la propagación de vibraciones.

6.2 APORTES

Se propone desarrollar un nuevo procedimiento de diseño para el sistema de transmisión de potencia, acorde a las necesidades de versatilidad requeridas a lo largo de la línea de ensamblaje para elementos aeronáuticos.

Se presenta una metodología para el cálculo de la fuerza de tracción de la llanta mecanum, bajo consideraciones de la superficie y la deformación rodillo determinadas.

Se desarrolló un diseño geométrico de la llanta mecanum, y posteriormente se validó su integridad estructural y comportamiento durante etapa de operación, utilizando herramientas computacionales mediante el método de elementos finitos.

6.3 RECOMENDACIONES

Se recomienda diseñar un sistema de control que tenga en cuenta los sentidos de giro de cada servomotor para el desplazamiento adecuado en el espacio designado de la línea de ensamble

El sistema de transporte terrestre no se debe sobrecargar con elementos que tengan pesos mayores a los presentados en este proyecto; debido a que pone en riesgo la integridad estructural del sistema de transmisión de potencia.

La superficie sobre la cual se deben apoyar las llantas mecanum no debe presentar desniveles o baches; estas llantas fueron diseñadas bajo esta designación y se desconoce el comportamiento de las mismas en una situación ajena a la presentada en el proyecto.

Determinar de forma experimental o mediante técnicas de simulación por elementos finitos la rigidez y resistencia del sistema de acople de la llanta Mecanum. Con el objetivo de garantizar la integridad de todo el sistema de transmisión de potencia.

El desarrollo de los cálculos se realizó bajo las consideraciones de una la superficie plana y el rodillo sin deformación; esto genera un cálculo conservador del par motor, por lo que se recomienda ampliar los estudios considerando la deformación del rodillo.

Para la selección del servomotor es necesario adicionar una caja reductora de velocidad que aumente el par motor, disminuya las revoluciones y reduzca la potencia requerida en el sistema.

REFERENCIAS

- [1] J. Zins, "Factory Futures," 2016. [Online]. Available: <http://factory-futures.univ-lorraine.fr/contact/>.
- [2] KUKA, "Robots industriales de KUKA," 2017. [Online]. Available: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial>.
- [3] KUKA, "Omnimove drive technology," 2017. [Online]. Available: <https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/movilidad/plataformas-moviles/kuka-omnimove>.
- [4] DASSAULT SYSTÈMES, "Solidworks." Massachusetts, 2016.
- [5] S. C. CARLOS MONTOYA, "assignment progress description," PEREIRA, 2016.
- [6] M. Guiggiani, *The science of vehicle dynamics: Handling, braking, and ride of road and race cars*. Pisa, Italy: SpringerScience, 2014.
- [7] J. Blumrich, "Omnidirectional wheel," 1972.
- [8] F. Adăscăliței, "PRACTICAL APPLICATIONS FOR MOBILE ROBOTS BASED ON MECANUM WHEELS -A SYSTEMATIC SURVEY," *Opt. Mechatronics*, no. 40, 2011.
- [9] B. E. Ilon, "Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base," 13-Nov-1972.
- [10] SIEMENS, "Catálogo Servomotores." p. 189, 2004.
- [11] LENZE, "MCS synchronous servo motors," 2017. [Online]. Available: <http://www.lenze.com/en-fr/products/motors/servo-motors/mcs-synchronous-servo-motors/>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [12] R. L. Norton, *Design of Machinery*, Second edi., vol. 125, no. 3. New Jersey: Pearson Education Inc., 2003.
- [13] G. Berdichevsky, K. Kelty, J. Straubel, and E. Toomre, "The Tesla Roadster Battery System Tesla Motors," 2007. [Online]. Available: <http://large.stanford.edu/publications/power/references/docs/tesla.pdf>. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [14] C.-L. H. Cheng-Hua FU, Rui Xu, "Lithium ion battery," 2010.
- [15] EV WEST, "Tesla Smart Lithium Ion 18650 EV Module." [Online]. Available: http://www.evwest.com/catalog/product_info.php?cPath=4&products_id=329. [Accessed: 02-Nov-2017].
- [16] W. Le, "DESIGN OF TRACTION TRANSMISSION AND SUSPENSION SYSTEMS FOR AN OMNI-DIRECTIONAL MOBILE ROBOT," LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2015.
- [17] V. S. Ioan Doroftei, Victor Grosu, *Omnidirectional Mobile Robot – Design and Implementation*, vol. 6. Romania: INTECH Open Access Publisher, 2007, 2007.
- [18] I. ANSYS, "Engineering Simulation & 3-D Design Software | ANSYS." Delaware, USA, 2017.
- [19] R. L. MOTT, *Resistencia de materiales*, 5a Ed. México, 2009.

- [20] Aceros Bravo LTDA., "ACEROS ALEADOS." [Online]. Available: <http://www.acerosbravo.cl/imgmodulo/Imagen/116.pdf>. [Accessed: 22-Nov-2017].
- [21] GRANTA DESIGN LTDA, "CES EduPack." Cambridge, Inglaterra, 2013.
- [22] M. R. Súnico, "ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA," ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS, 2005.
- [23] CATEC, "Análisis Modal," 2017. [Online]. Available: <http://www.catec.aero/materiales-y-procesos/lisis-modal.htm>. [Accessed: 24-Nov-2017].

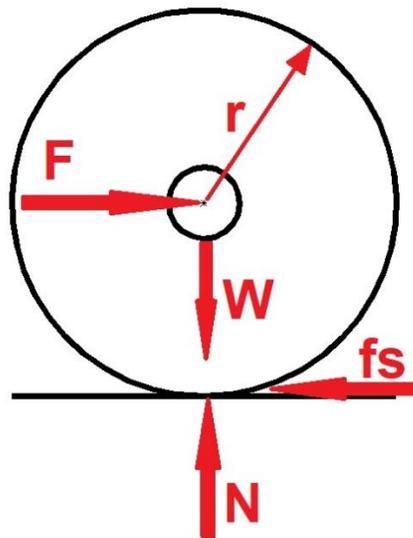
ANEXO A

CÁLCULOS PARA DETERMINAR FUERZA SOBRE EL ÁRBOL

Para el cálculo de la fuerza de arrastre en este caso, se debe tener 2 importantes consideraciones: a) la superficie es plana y no debe existir cambios de nivel o baches y b) se desprecia la deformación del rodillo, por tal motivo este cálculo se considera conservador.

Para determinar la fuerza sobre el árbol, es necesario hacer un diagrama de cuerpo libre sobre una de las llantas. (ver figura...)

Figura 1.A. Diagrama de cuerpo libre.



Donde:

- F : Fuerza sobre el eje
- F_s : Fuerza debido a la fricción
- W : Peso
- K : coeficiente de fricción
- N : Reacción normal
- r : Radio de la llanta
- T : Par motor
- P : Potencia
- ω : velocidad angular

Basado en el diagrama de cuerpo libre se realiza sumatoria de fuerzas en los ejes coordenados X y Y (suponiendo Y positivo en dirección de la normal N y X positivo en dirección a la fuerza F) (ver figura...).

$$\sum_y^{(+)\uparrow} W + N = 0 \quad \text{Ecuación A}$$

$$\sum_x^{(+)\rightarrow} F + f_s = 0 \quad \text{Ecuación B}$$

El coeficiente de fricción es determinado para el rozamiento entre caucho y asfalto. De las sumatorias se despeja la variable F y encontramos la siguiente relación:

$$F = f_s = K * N \quad \text{Ecuación C}$$

$$F = 0,5 * 4930 \text{ N}$$

$$F = 2465 \text{ N}$$

CÁLCULOS PARA DETERMINAR PAR MOTOR SOBRE EL ÁRBOL

Para determinar el par motor con el tipo de llanta omnidireccional se utiliza la siguiente relación:

$$T = (F * r * \sqrt{2})/4 \quad \text{Ecuación D}$$

$$T = (2465 \text{ N} * 0,18 \text{ m} * \sqrt{2})/4$$

$$T = 156,87 \text{ Nm}$$

Para determinar el par motor con el tipo de llanta Mecanum se utiliza la siguiente relación:

$$T = (F * r)/4 \quad \text{Ecuación E}$$

$$T = (2465 \text{ N} * 0,18 \text{ m})/4$$

$$T = 110,92 \text{ Nm}$$

CÁLCULOS PARA DETERMINAR LA POTENCIA

Para determinar la potencia con el tipo de llanta omnidireccional o Mecanum, se utiliza la siguiente relación:

$$P = T * \omega \quad \text{Ecuación F}$$

Para el tipo de llanta omnidireccional al se obtiene el siguiente resultado:

$$P = 156,87 \text{ Nm} * 4,6296 \text{ rad/s}$$

$$P = 726,25 \text{ W}$$

Para el tipo de llanta omnidireccional al se obtiene el siguiente resultado:

$$P = 110,92 \text{ Nm} * 4,6296 \text{ rad/s}$$

$$P = 513,54 \text{ W}$$

CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DE LLANTA MECANUM

Para el diseño geométrico de esta llanta, es necesario saber el número de rodillos albergados en el cubo o núcleo.

$$L_w = L_r * \cos(\gamma) = 2 * R * \frac{\sin \frac{\pi}{n}}{\tan \gamma} \quad \text{Ecuación G}$$

De la ecuación se despeja el número de rodillos n.

$$n = \frac{\pi}{\sin^{-1}\left(\frac{L_w * \tan \gamma}{2 * R}\right)} \quad \text{Ecuación H}$$

Se reemplaza con los datos conocidos de Lw, R y γ .

$$n = \frac{\pi}{\sin^{-1}\left(\frac{137mm * \tan \frac{\pi}{4} rad}{2 * 180mm}\right)} = 8,047175678 \text{ rodillos} \cong 8 \text{ rodillos}$$

El largo de los rodillos Lr es determinado mediante la siguiente ecuación .

$$L_r = 2 * R * \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{\sin \gamma} = 2 * R * \frac{\sin \frac{\pi}{n}}{\sin \gamma}$$

Se reemplaza con los datos conocidos de n, R y γ .

$$L_r = 2 * 180mm * \frac{\sin \frac{\pi}{8}}{\sin \frac{\pi}{4} rad}$$

$$L_r = 194,8305895 \text{ mm}$$

Por último, se calcula el ángulo de comprendido entre los puntos proyectados de la longitud del eje de la llanta el cual se despeja de la ecuación del largo de tornillo Lr.

$$\varphi = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{L_r * \sin \gamma}{2 * R} \right) \quad \text{Ecuación I}$$

Se reemplaza con los datos conocidos de Lr, R y γ .

$$\varphi = 2 * \sin^{-1} \left(\frac{194,8305895mm * \sin \frac{\pi}{4}}{2 * 180mm} \right)$$

$$\varphi = 0,785398 \text{ rad} = 45^\circ$$

RODILLO

Para el diseño de los rodillos, es necesario saber el radio final de la llanta (R) y la longitud de cada rodillo (Lr) la cual fue previamente calculada en el diseño geométrico del cubo o núcleo.

$$\frac{1}{2}x^2 + y^2 - R^2 = 0 \quad \text{Ecuación J}$$

Despejando "y" se obtiene:

$$y = \sqrt{R^2 - \frac{x^2}{2}} \quad \text{Ecuación K}$$

Reemplazando el valor de radio (R).

$$y = \sqrt{180mm^2 - \frac{x^2}{2}} \quad \text{Ecuación L}$$

CALCULO DE ERROR RELATIVO PARA ANÁLISIS DE INDEPENDENCIA DE MALLA

En este caso, el cálculo del error relativo se usa para determinar la diferencia que existe entre dos puntos consecutivos del análisis de malla. se calculo con la siguiente expresión:

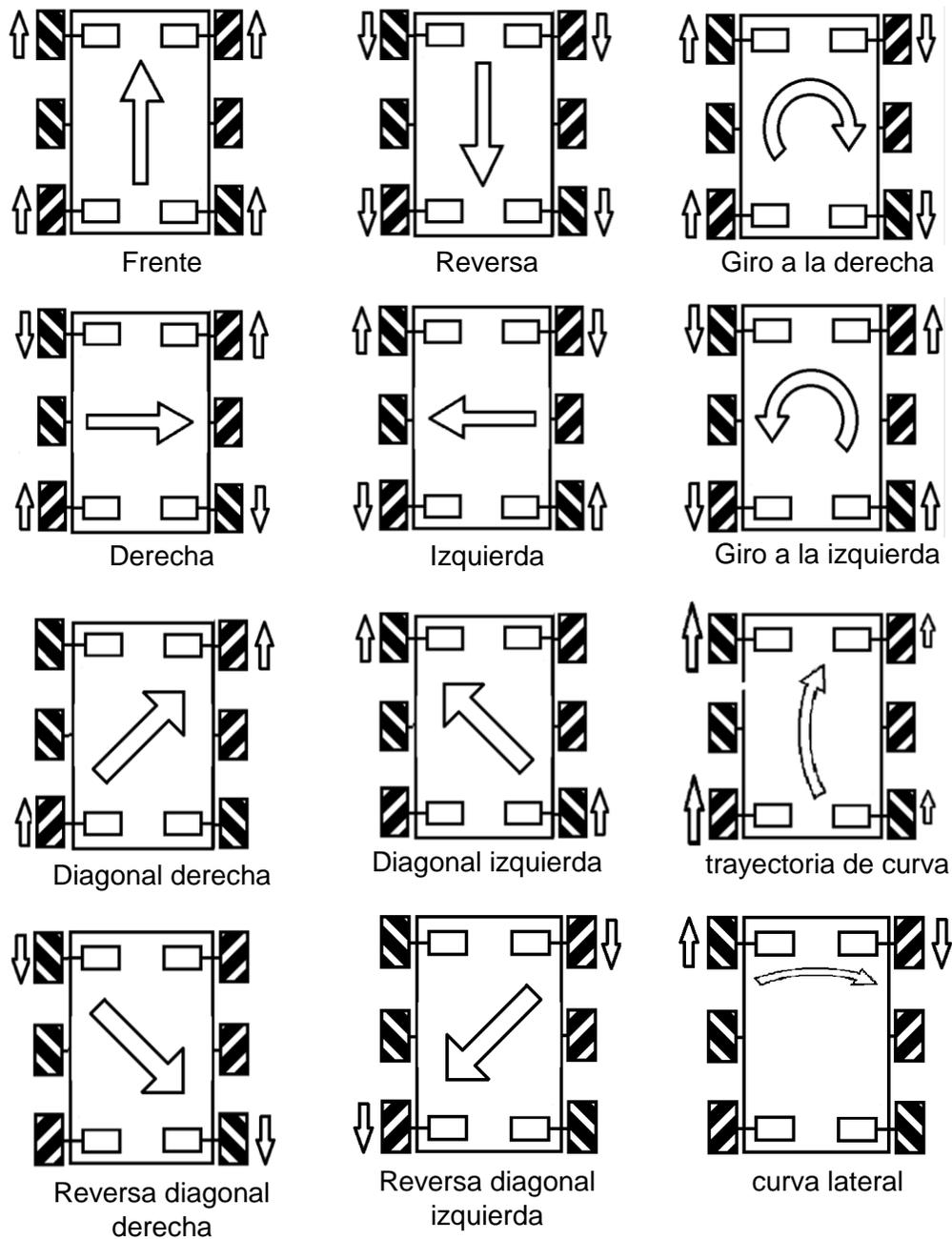
$$\varepsilon_r = \left| \frac{\text{punto analizado} - \text{punto siguiente}}{\text{punto analizado}} \right| * 100 \quad \text{Ecuación M}$$

$$\varepsilon_r = \left| \frac{202,68 \text{ MPa} - 228,37 \text{ MPa}}{202,68 \text{ MPa}} \right| * 100$$

$$\varepsilon_r = 12,675\%$$

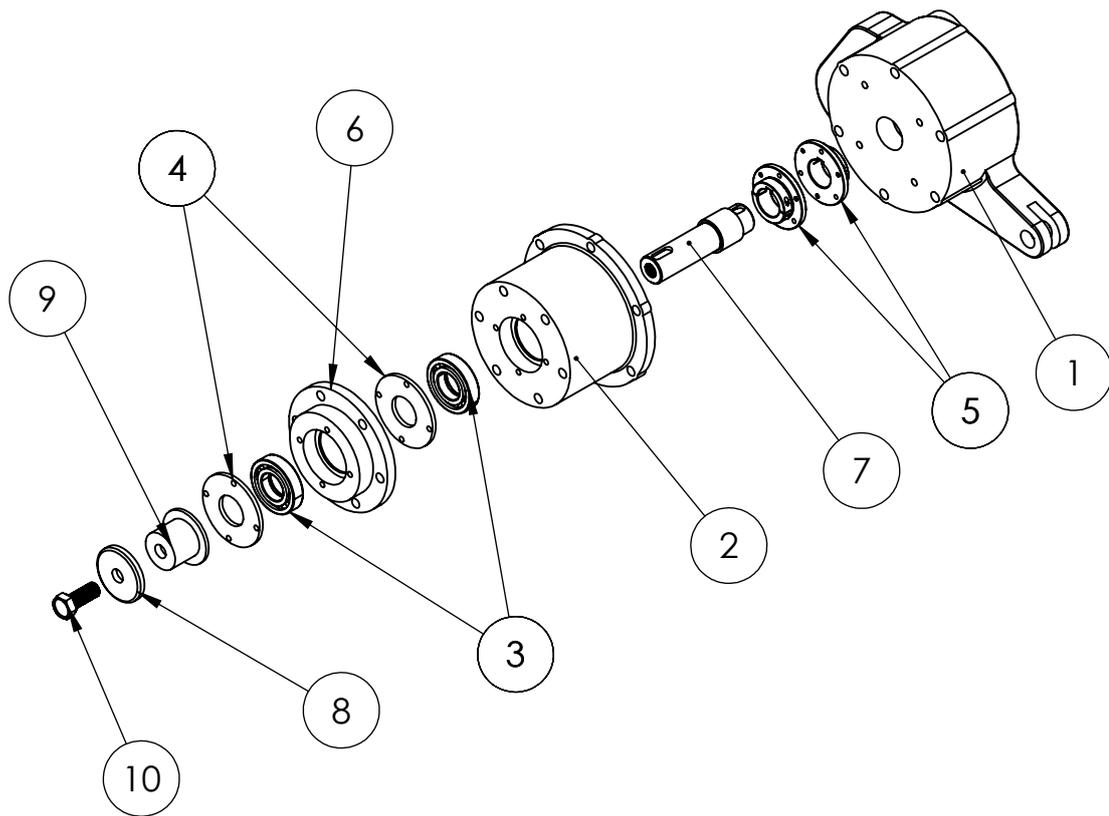
ANEXO B

Figura 1.B. configuraciones para el sentido de desplazamiento



ANEXO C

Planos de los elemento del sistema de transmisión de potencia.

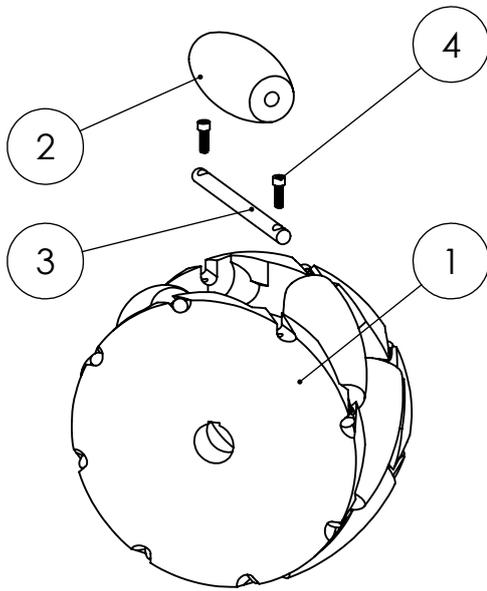


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Acople principal		1
2	Soporte mayor		1
3	Rodamientos	NUP208	2
4	Tapas de apoyo	Para mantener el rodamiento en posición	2
5	Acople de eje		1
6	Soporte menor		1
7	Árbol de transmisión	Acero AISI/SAE 4340 Recocido	1
8	Arandela		1
9	Buje		1
10	Tornillo	tornillo hexagonal M20x2,5x50	1

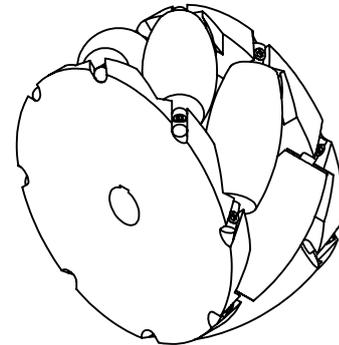
DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



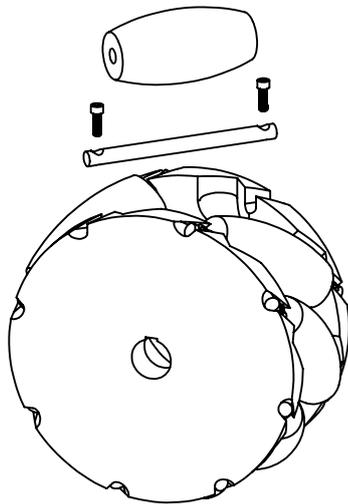
Unidades: mm	Realizó: JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO	Fecha: 26/11/2017
Escala: 1:10	Elemento : EXPLOSIÓN DEL SISTEMA DE ACOPLE	



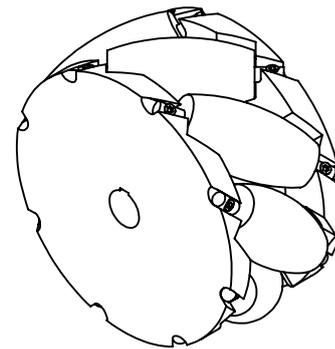
vista dimetrica



llanta sentido anti-horario



vista dimetrica



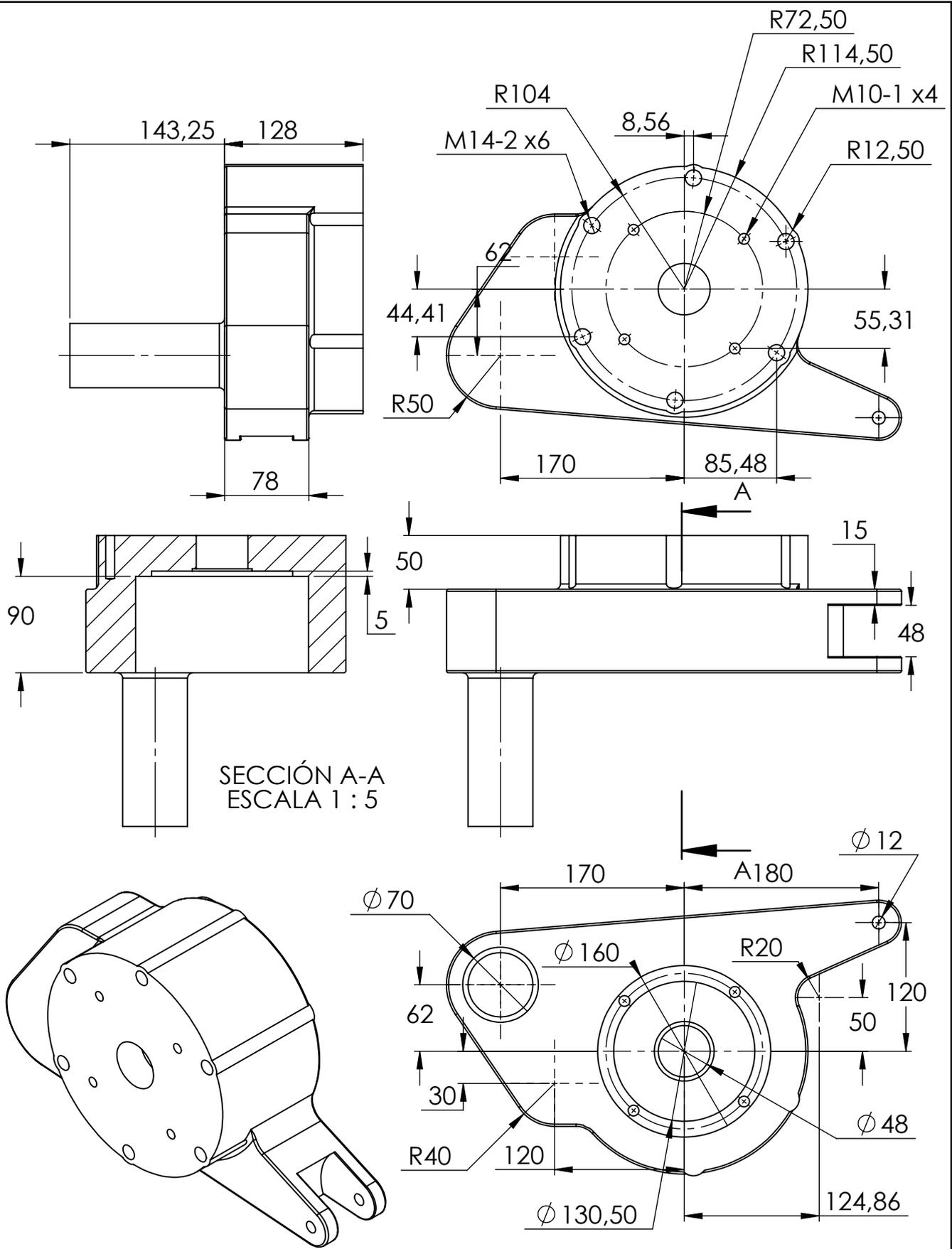
llanta sentido horario

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Núcleo	Aluminio EN AC-48000	1
2	Rodillo	Caucho	8
3	Eje del rodillo	4340 templado@205°C	8
4	Tornillo rodillo	ALLEN M10x1,5 longitud 32mm	16

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



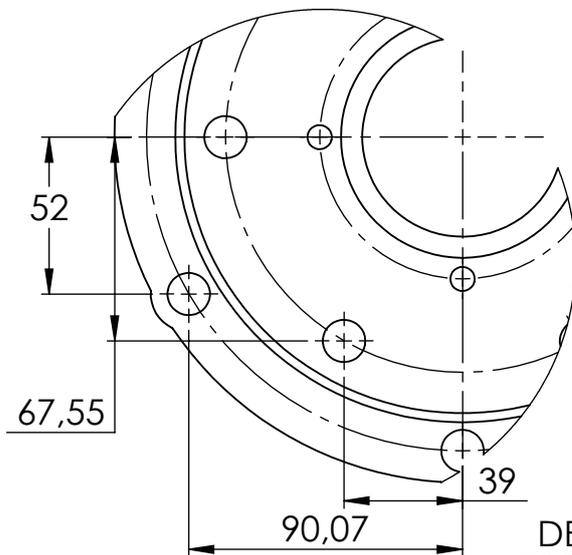
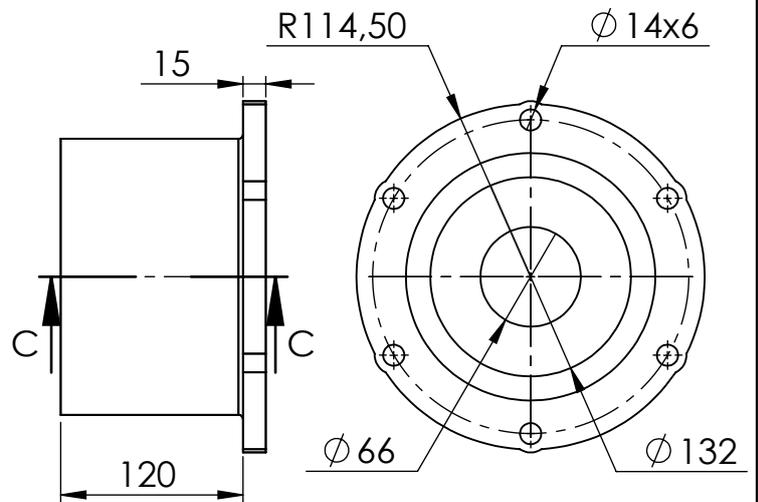
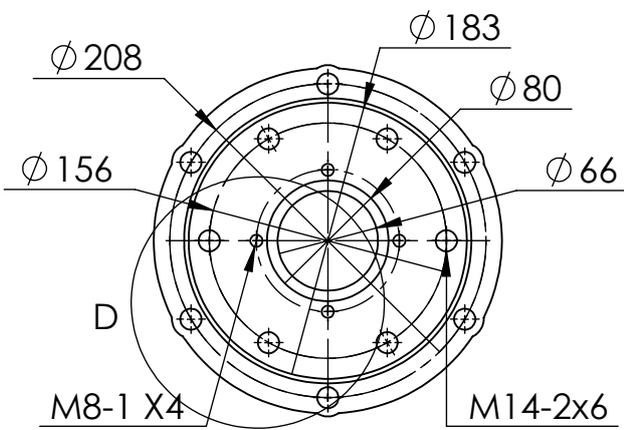
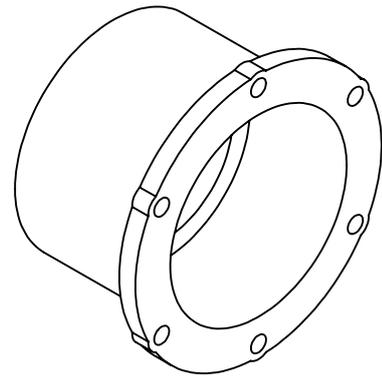
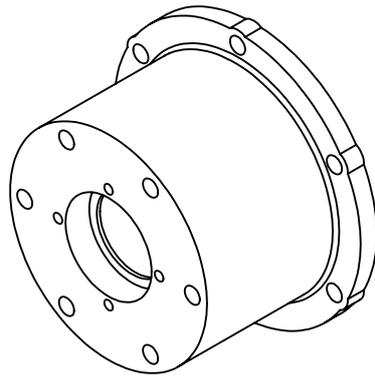
Unidades: mm	Realizó: JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO	Fecha: 26/11/2017
Escala: 1:10	Elemento : EXPLOSIÓN LLANTAS MECANUM	



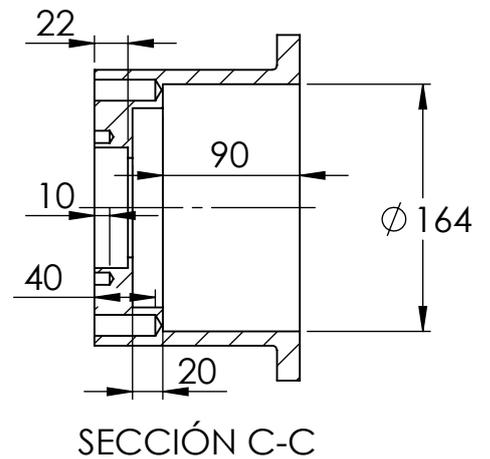
DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



Unidades: mm	Realizó: JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO	Fecha: 26/11/2017
Escala: 1:5	Elemento: ACOPLE PRINCIPAL	



DETALLE D
ESCALA 2 : 5



DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



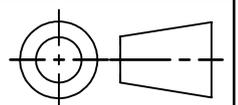
Unidades:
mm

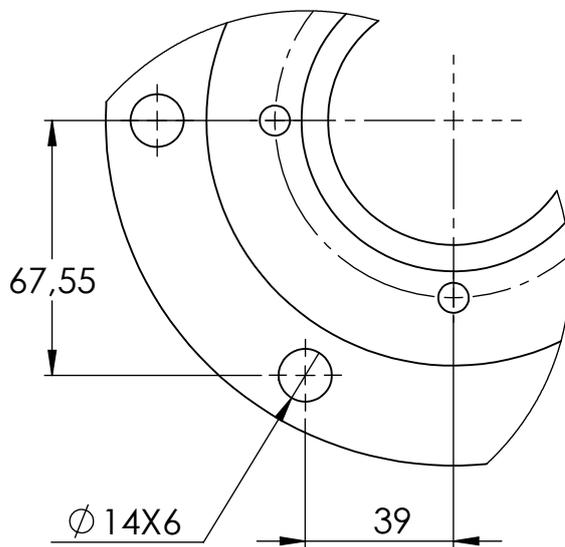
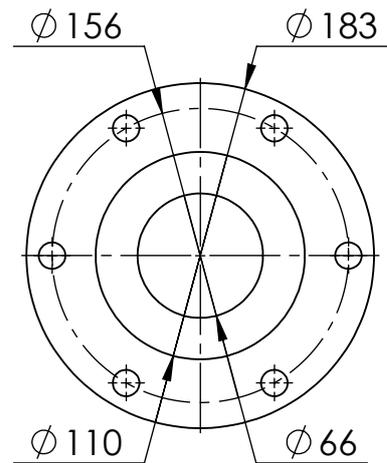
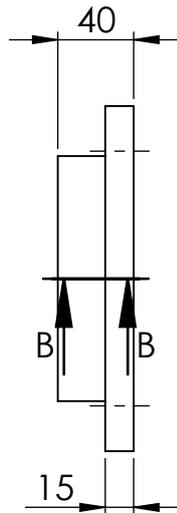
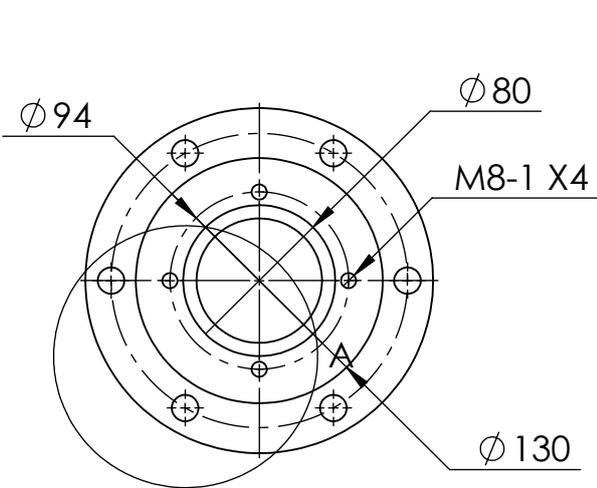
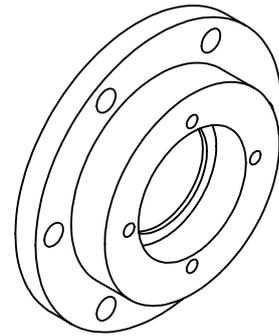
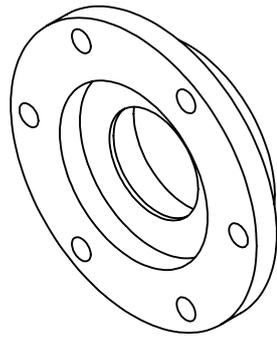
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

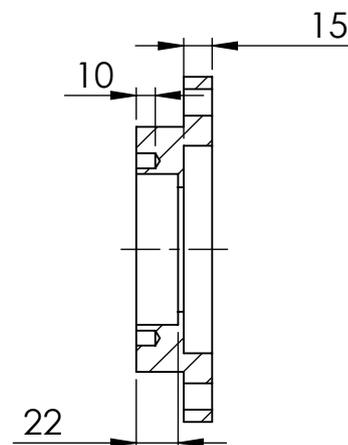
Escala:
1:5

Elemento :
SOPORTE MAYOR





DETALLE A



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 4

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



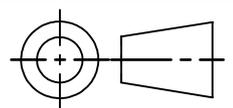
Unidades:
mm

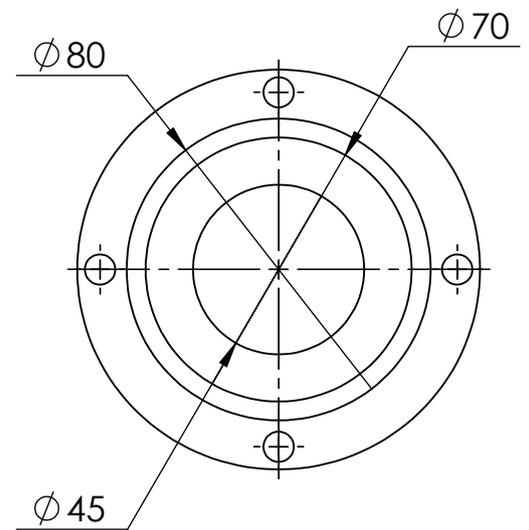
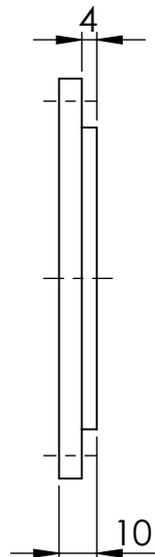
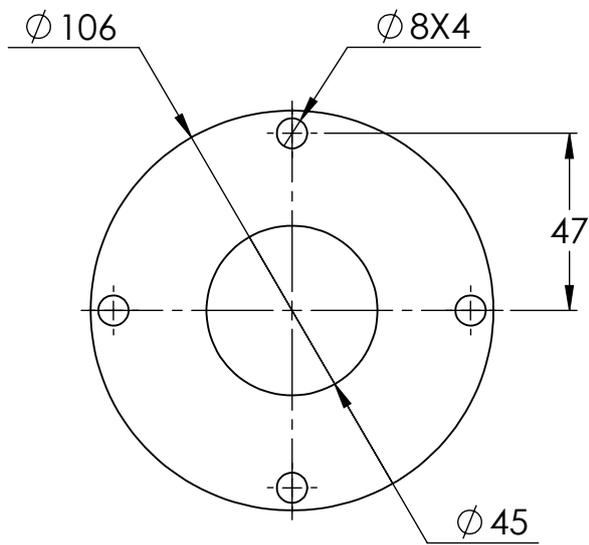
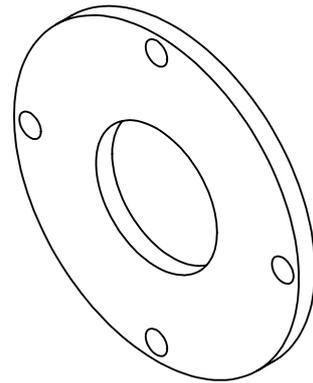
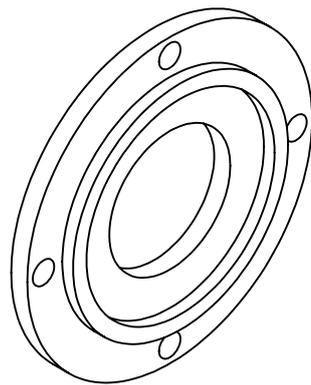
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

Escala:
1:4

Elemento :
SOPORTE MENOR

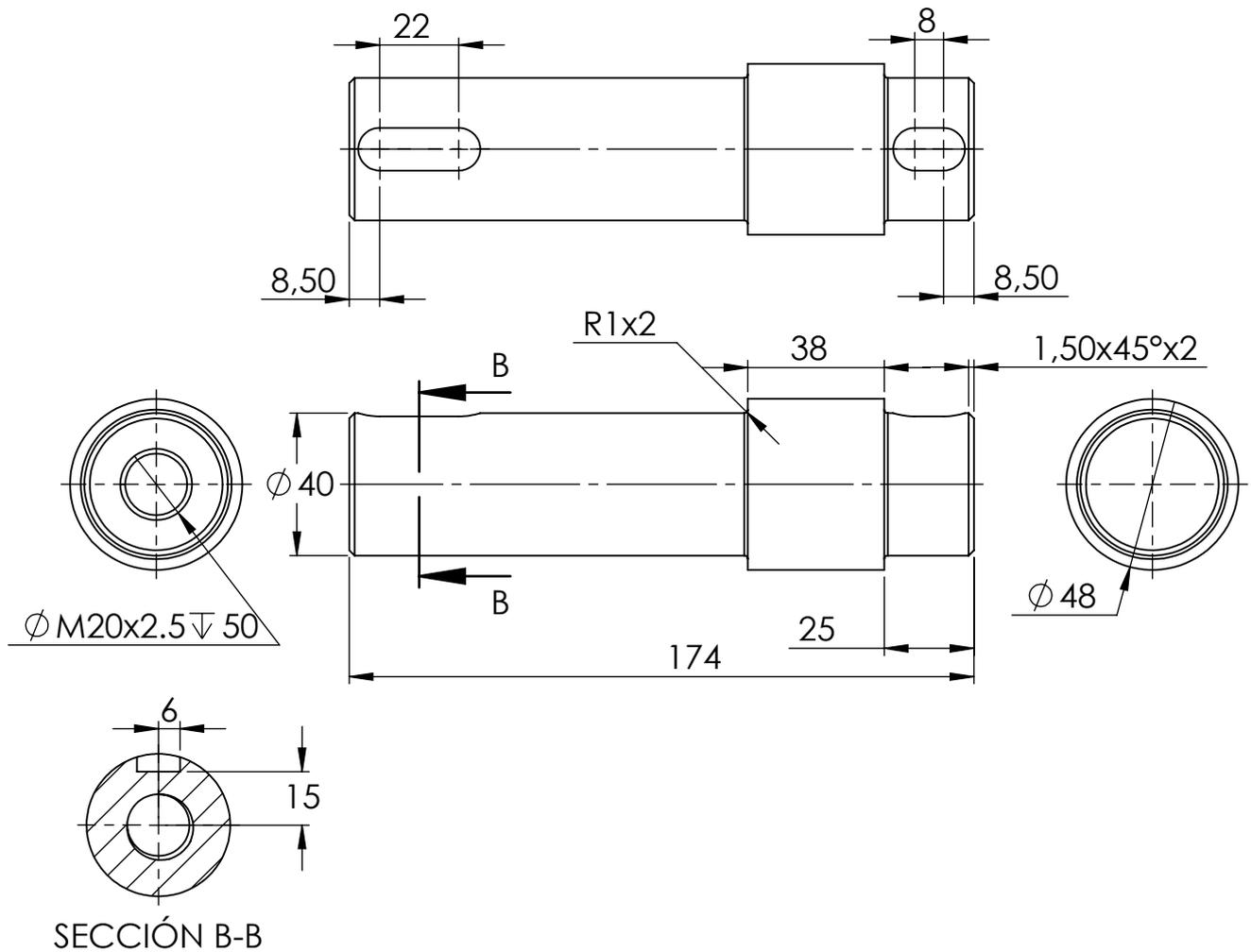
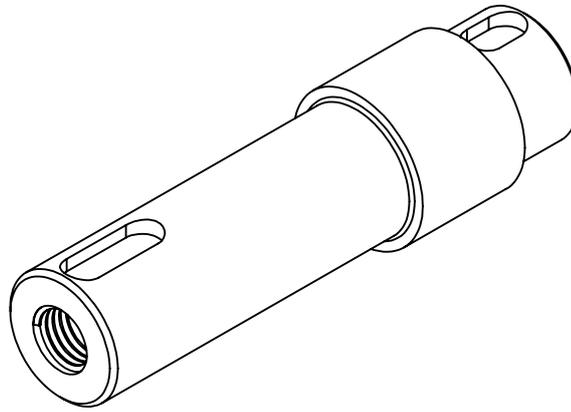




DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



Unidades: mm	Realizó: JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO	Fecha: 26/11/2017
Escala: 1:2	Elemento : TAPA APOYO PARA RODAMIENTO	



DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



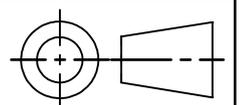
Unidades:
mm

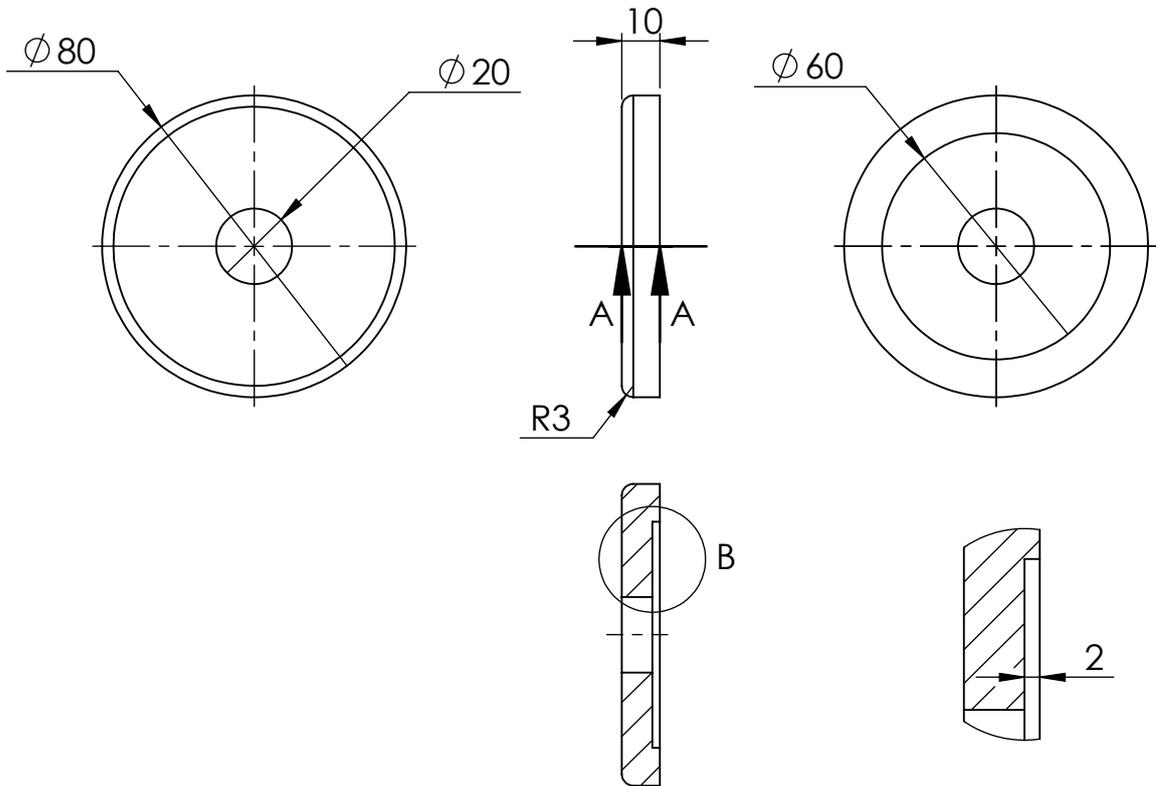
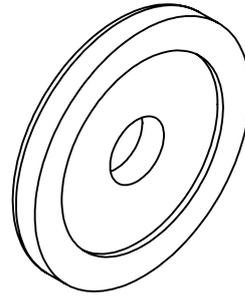
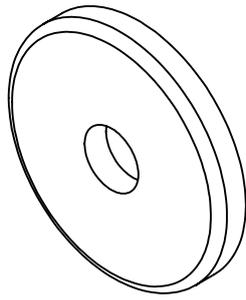
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

Escala:
1:2

Elemento:
ÁRBOL DE TRANSMISIÓN





SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2

DETALLE B

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



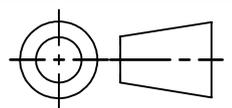
Unidades:
mm

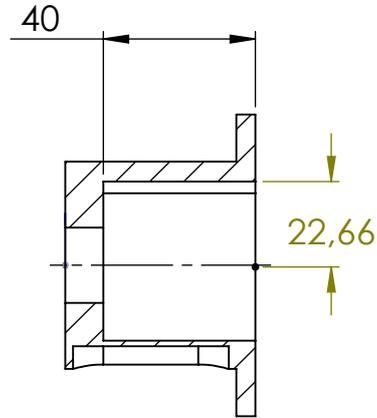
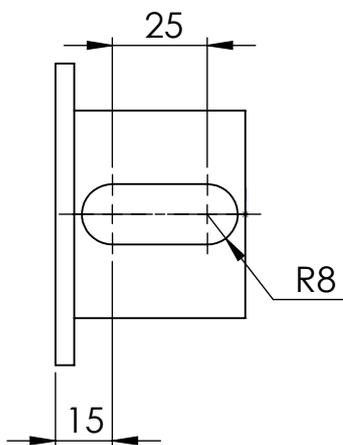
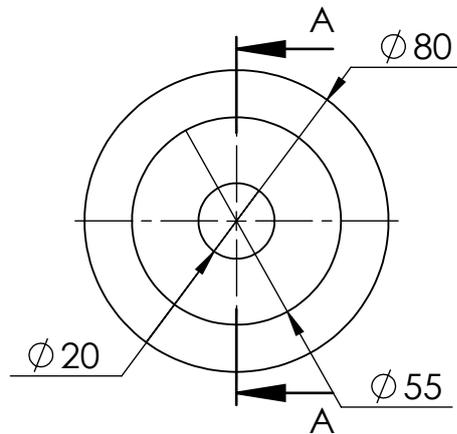
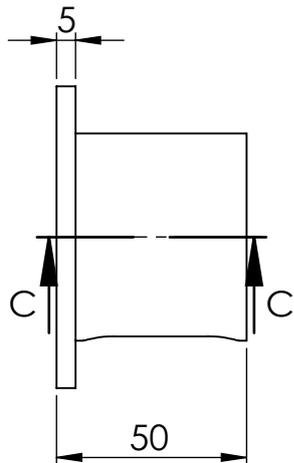
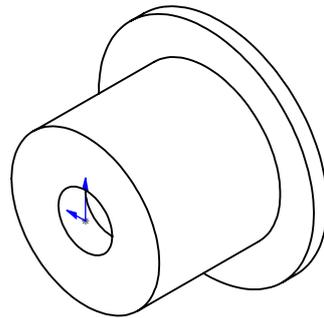
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

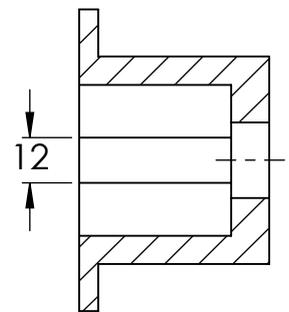
Escala:
1:2

Elemento :
ARANDELA





SECCIÓN A-A



SECCIÓN C-C

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



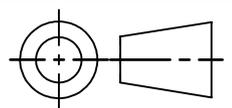
Unidades:
mm

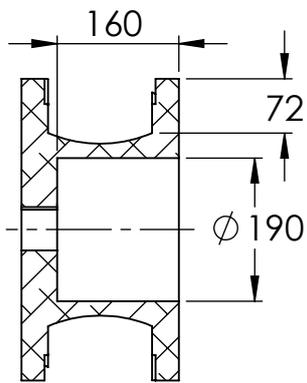
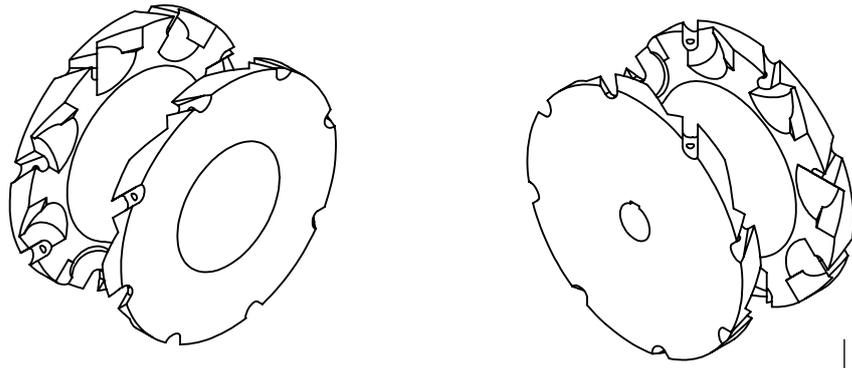
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

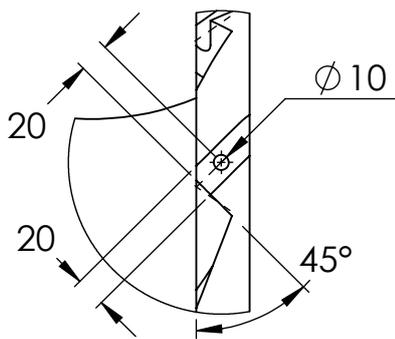
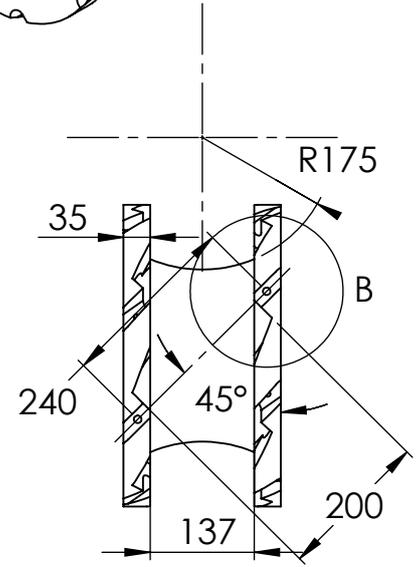
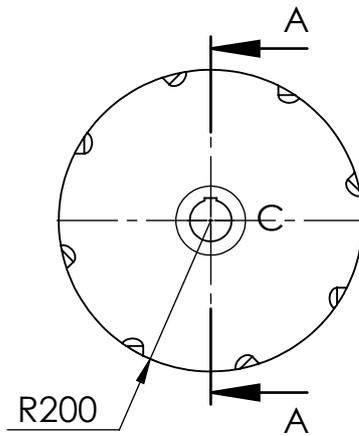
Escala:
1:2

Elemento :
BUJE DE ACOPLAMIENTO

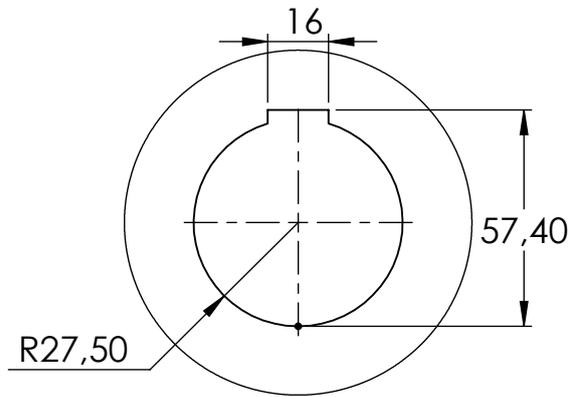




SECCIÓN A-A



DETALLE B
ESCALA 1 : 5



DETALLE C
ESCALA 1 : 2

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



Unidades:
mm

Realizó:

JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

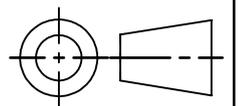
Fecha:

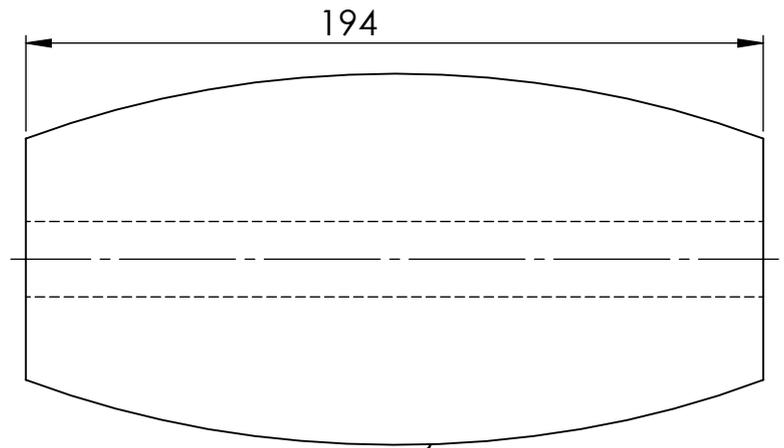
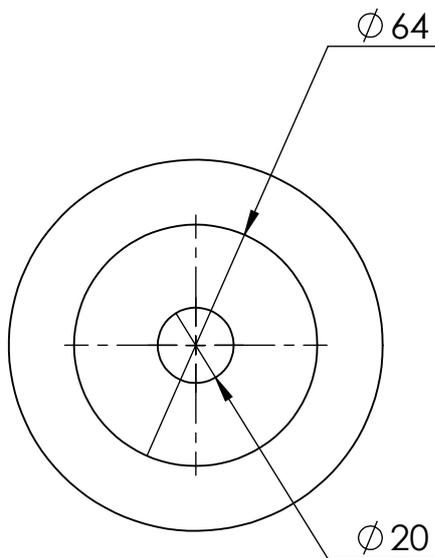
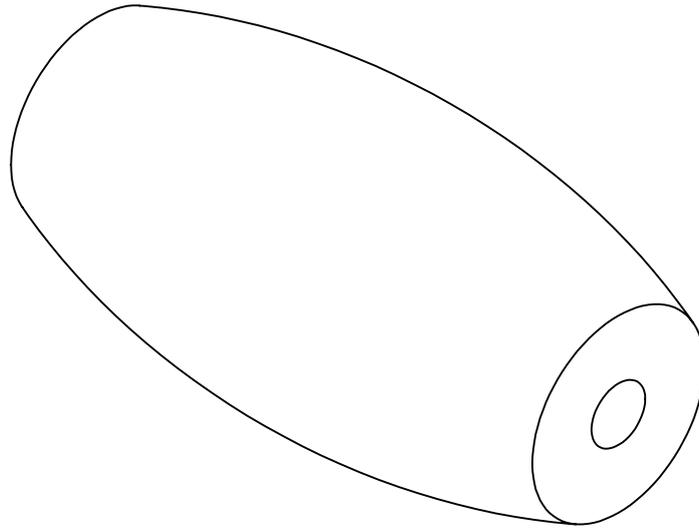
26/11/2017

Escala:
1:10

Elemento :

NÚCLEO



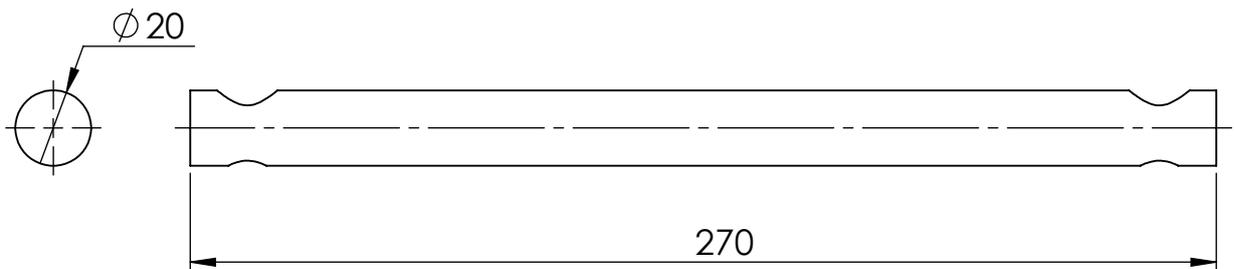
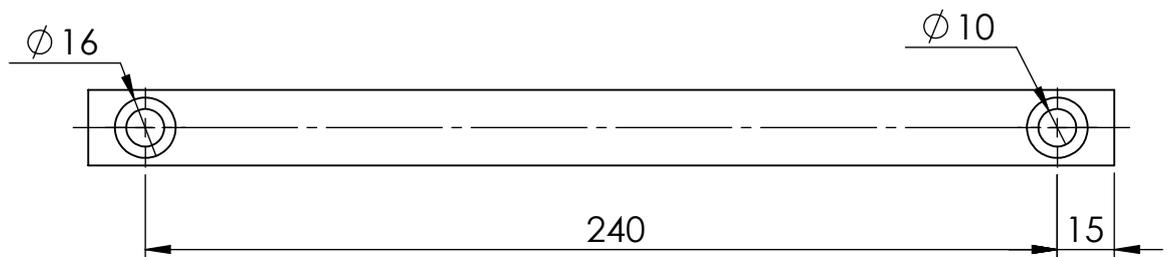
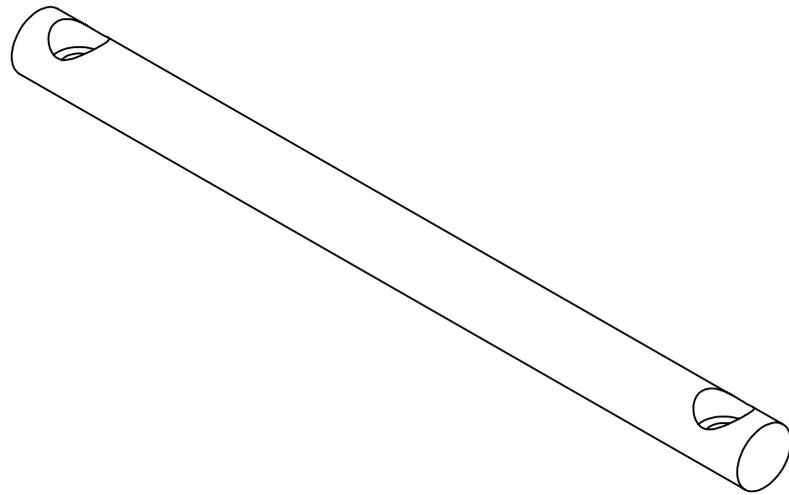


$$(1/2)x^2 + y^2 = 180$$

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



Unidades: mm	Realizó: JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO	Fecha: 26/11/2017
Escala: 1:2	Elemento : RODILLO	



DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



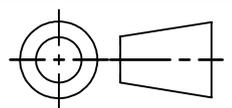
Unidades:
mm

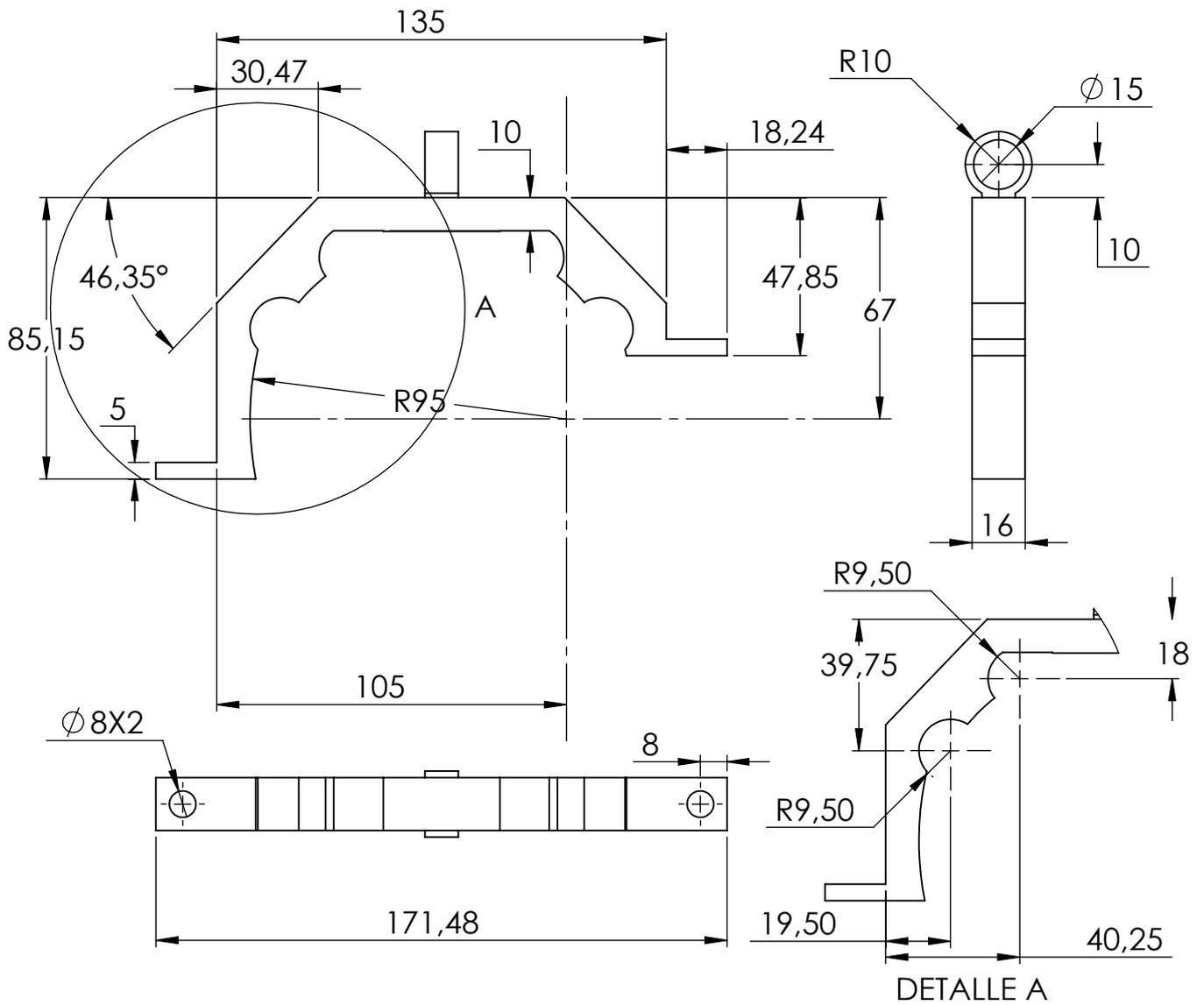
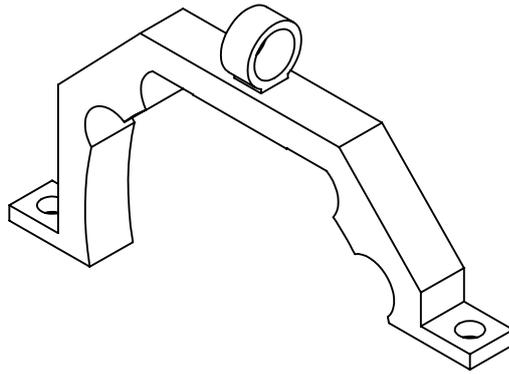
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

Escala:
1:2

Elemento :
EJE DEL RODILLO





DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



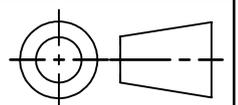
Unidades:
mm

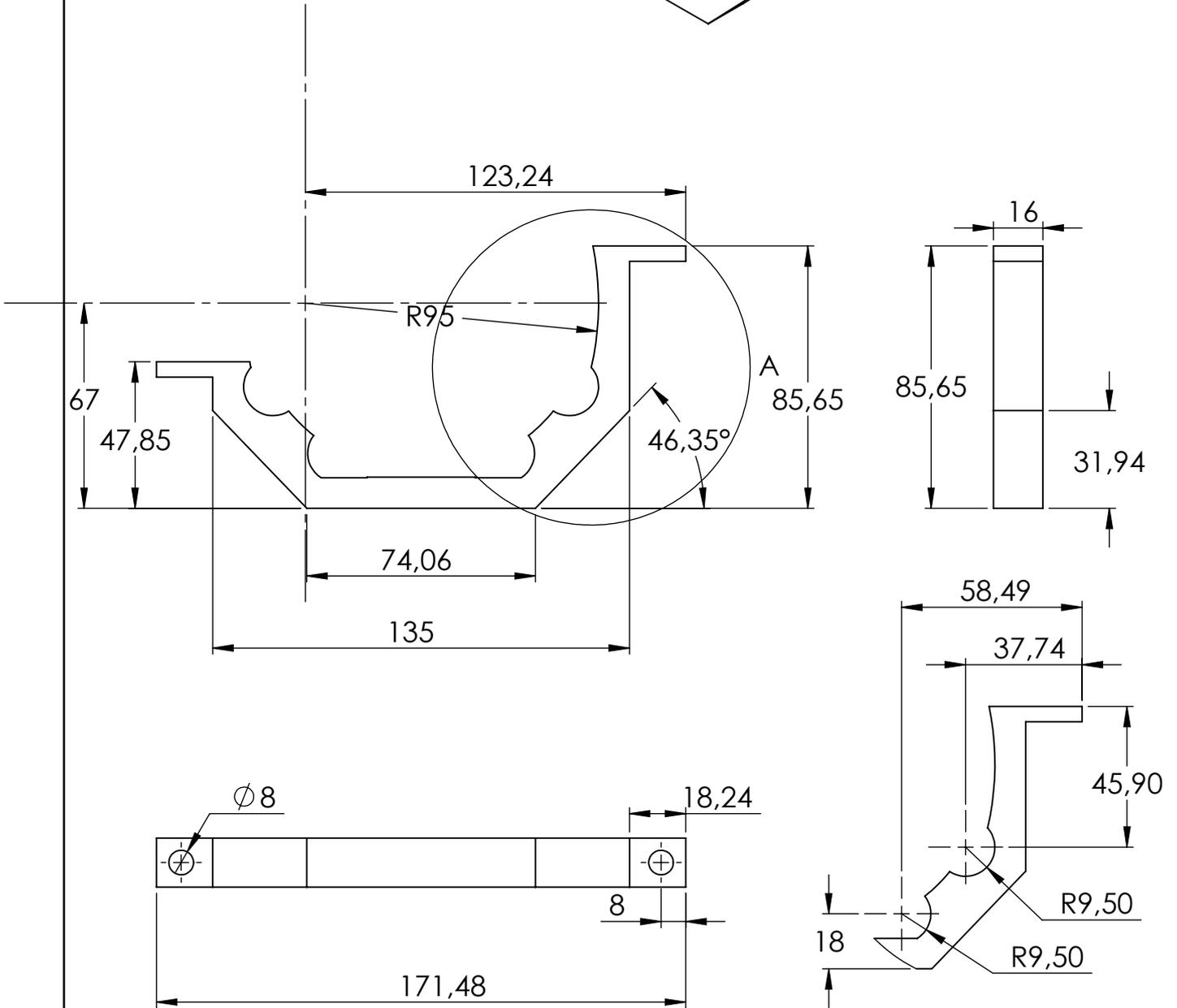
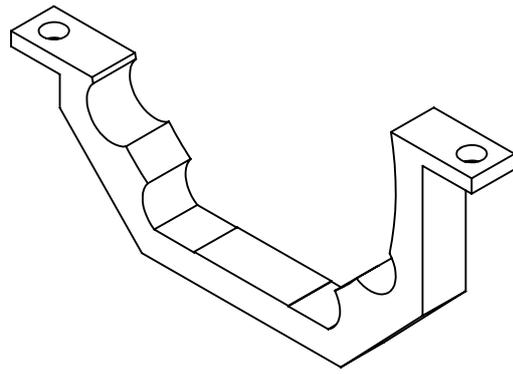
Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

Escala:
1:2

Elemento :
ANILLO SUPERIOR DE SOPORTE PARA MOTOR





DETALLE A

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA UN SISTEMA DE TRANSPORTE TERRESTRE PARA LÍNEAS DE ENSAMBLAJE AERONÁUTICO



Unidades:
mm

Realizó:
JUAN SEBASTIAN VARGAS LOZANO

Fecha:
26/11/2017

Escala:
1:2

Elemento :
ANILLO INFERIOR DE SOPORTE PARA MOTOR

