



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GIROSCOPIO PARA EL
LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**

Autor: Oscar Francisco Ledesma Cárdenas

Tutor: Ing. Mg. Gonzalo Eduardo López Villacís

AMBATO – ECUADOR

Marzo - 2023


CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GIROSCOPIO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, elaborado por el señor **Oscar Francisco Ledesma Cárdenas**, portador de la cedula de ciudadanía C.I. 1724424823, estudiante de la Carrera de Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, marzo 2023



.....
Ing. Mg. Gonzalo Eduardo López Villacís
TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, **Oscar Francisco Ledesma Cárdenas**, con C.I. 1724424823, declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Proyecto Técnico con el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GIROSCOPIO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**, así como también tablas, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto técnico, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, marzo 2023



.....
Oscar Francisco Ledesma Cárdenas

C.I. 1724424823

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, marzo 2023



Oscar Francisco Ledesma Cárdenas

C.I. 1724424823

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Oscar Francisco Ledesma Cárdenas, de la Carrera de Mecánica bajo el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GIROSCOPIO PARA EL LABORATORIO DE FÍSICA DE LA CARRERA DE MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”**.

Ambato, marzo 2023

Para constancia firman:

.....
Ing. Mg. Jorge Enrique López Velástegui
MIEMBRO CALIFICADOR

.....
Ing. Mg. Diego Fernando Núñez Núñez
MIEMBRO CALIFICADOR

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado en memoria de mi difunto padre Juan Francisco, que desde el cielo ha estado siempre conmigo y estaría orgulloso de todo lo que he logrado, con infinito amor a mi madre Elena por ser el pilar fundamental en mi vida y en mi formación profesional, por su inigualable apoyo en cualquier situación que la vida me pusiera en frente, por nunca darme la espalda, de la misma forma te dedico todo el esfuerzo y dedicación de este proyecto.

A mi abuelita Beatriz por estar siempre presente en cada paso que he dado, por cada consejo que con sabiduría me ha dado y por todo el apoyo que me ha brindado.

A mi querido hermano Alberto por los inigualables momentos que hemos vivido juntos y por muchos momentos más que la vida nos tiene preparados, sean buenos o malos sabemos que no estamos solos, nos tenemos el uno al otro.

A mi novia y compañera de vida Jennifer por haberme acompañado durante este largo proceso, por brindarme su apoyo incondicional y nunca dejar que me rindiera.

A mis amigos con quienes compartí buenos momentos y siempre creyeron en mí, las metas se logran, con esfuerzo y perseverancia se cumplen nuestros sueños y aspiraciones.

Oscar Francisco Ledesma Cárdenas

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar el más sincero agradecimiento a mi madre, por siempre luchar por el bienestar de su familia, por inculcarme valores, por enseñarme a ser constante y perseverante, por educarme como un hombre de bien y por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi abuelita y a mi hermano por su presencia en el proceso y por siempre creer en mí, fue mi motivación para superarme día tras día.

Un agradecimiento especial al Ing. Galo Mayorga por brindarme sus consejos e importantes conocimientos que serán útiles en mi vida profesional.

A mi querida novia y compañera de vida Ing. Jennifer Mayorga por estar siempre a mi lado apoyándome.

A todos los docentes que me instruyeron profesionalmente en especial al Ing. Gonzalo López por brindarme su apoyo en el desarrollo de mi proyecto de titulación.

Oscar Francisco Ledesma Cárdenas.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.1.1. Fundamentación Teórica.....	3
1.1.1.1. El giroscopio	3
1.1.1.2. Giroscopio Mecánico	4
1.1.1.3. Giroscopios modernos.....	7
1.1.1.4. Principios Básicos de la Ingeniería Mecánica acerca de los Efectos Giroscópicos	9
1.2. Objetivos.....	21
1.2.1. Objetivo General.....	21
1.2.2. Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO II	22
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1. Materiales	22
2.1.1. Equipos	25
2.2.1. Descripción de la metodología	28
2.2.2. Selección de Alternativas.....	29
2.2.2.1. Valoración de los criterios para el diseño y construcción de un Giroscopio.	
32	

2.2.3.	Esquema general del Giroscopio Cardánico y sus componentes.....	36
2.2.4.	Parámetros de diseño	42
2.2.4.1.	Dimensionamiento preliminar.....	42
2.2.5.	Diseño y selección de componentes	43
2.2.5.1.	Diseño del eje.....	44
2.2.5.2.	Selección de rodamientos.....	54
2.2.5.3.	Selección del motor.....	56
2.2.5.4.	Análisis estático mediante software CAD para modelado mecánico.....	57
2.2.5.5.	Estudio de Fatiga.....	60
2.2.5.6.	Construcción del Giroscopio Cardánico	63
CAPÍTULO III.....		69
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
3.1.	Análisis y discusión de los resultados	69
3.1.1.	Evaluación de funcionamiento.....	69
3.1.2.	Costos del proyecto.....	72
CAPÍTULO IV.....		76
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
4.1.	Conclusiones.....	76
4.2.	Recomendaciones.....	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		78
ANEXOS.....		80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Magnitudes físicas fundamentales de las unidades del SI aplicadas en la teoría del giroscopio.....	10
Tabla 2. Propiedades Mecánicas del acero AISI 304.....	23
Tabla 3. Propiedades Mecánicas del acero AISI 1018.....	23
Tabla 4. Constantes físicas del Aluminio.....	24
Tabla 5. Constantes físicas del Bronce fosforado.	24
Tabla 6. Descripción de los valores a ponderar [22].....	31
Tabla 7. Valoración del peso específico de los criterios planteados.	32
Tabla 8. Valoración del criterio viabilidad de construcción.	33
Tabla 9. Valoración del criterio costo.	33
Tabla 10. Valoración del criterio ensamblaje y desensamblaje.	34
Tabla 11. Valoración del criterio mantenimiento.	34
Tabla 12. Valoración del criterio tamaño y peso.	35
Tabla 13. Conclusiones de la valoración de criterios.....	35
Tabla 14. Componentes del dispositivo.	37
Tabla 15. Altura del Plano de trabajo en función de la tarea [23].	42
Tabla 16. Parámetros iniciales de diseño.	43
Tabla 17. Vida útil de los diferentes tipos de máquinas [25].....	54
Tabla 18. Mediciones de la práctica.....	69
Tabla 19. Principales momentos de inercia del rotor sin masas adicionales.	71
Tabla 20. Costo de materia prima.	73
Tabla 21. Costos de maquinaria y mano de obra.	74
Tabla 22. Costos directos totales.....	74
Tabla 23. Costos Indirectos.....	74
Tabla 24. Costo total del proyecto.	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Peonzas y aplicaciones del giroscopio [1].	3
Figura 2. Giroscopio con un montaje en anillos de cardán [2].	4
Figura 3. Giroscopio mecánico y sus componentes [4].	4
Figura 4. Factor de estabilidad en función de la estabilidad del sesgo de los giroscopios [10].	8
Figura 5. Interpretación de la ecuación giroscópica [2].	20
Figura 6. Análisis vectorial del giroscopio [2].	21
Figura 7. Rodamientos cerámicos de bolas de precisión.	25
Figura 8. Motor eléctrico.	25
Figura 9. Torno paralelo de precisión.	26
Figura 10. Máquina balanceadora.	27
Figura 11. Soldadora SMAW.	27
Figura 12. Fresadora CNC de 3 ejes.	28
Figura 13. Fases de la metodología del proyecto.	28
Figura 14. Giroscopio de súper precisión [14].	30
Figura 15. Giroscopio Cardánico [21].	30
Figura 16. Giroscopio de tres ejes [21].	30
Figura 17. Vista Isométrica del Giroscopio Cardánico.	36
Figura 18. Vista frontal del Giroscopio Cardánico.	36
Figura 19. Diferentes alturas de plano de trabajo dependiendo de la naturaleza del trabajo [23].	42
Figura 20. Eje y Rotor.	44
Figura 21. Diagrama de cuerpo libre para la determinación de reacciones.	45
Figura 22. Diagrama de Fuerza Cortante.	46
Figura 23. Diagrama de Momento Flector.	46
Figura 24. Eje redondo con filete en el hombro en torsión [24].	48
Figura 25. Eje redondo con filete en el hombro en flexión [24].	49
Figura 26. Sensibilidad a la muesca "q" en flexión inversa [24].	49
Figura 27. Sensibilidad a la muesca "q cortante" en torsión inversa [24].	50

Figura 28. Parámetros en el factor de condición superficial de Marin [24].	51
Figura 29. Factores de confiabilidad k_e de 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga [24].	52
Figura 30. Dimensiones de rodamientos rígidos de bolas [25].	55
Figura 31. Características del motor [26].	56
Figura 32. Parámetros de simulación.	57
Figura 33. Eje y rotor sujetos a sus condiciones iniciales.	58
Figura 34. Resultados de tensiones.	58
Figura 35. Resultados de desplazamientos.	59
Figura 36. Resultados de deformaciones unitarias.	59
Figura 37. Resultados del factor de seguridad.	60
Figura 38. Parámetros iniciales del estudio de fatiga.	61
Figura 39. Porcentaje de Daño.	61
Figura 40. Vida total.	62
Figura 41. Factor de Carga.	62
Figura 42. Proceso de mecanizado del eje.	63
Figura 43. Eje mecanizado.	64
Figura 44. Proceso de mecanizado del rotor.	64
Figura 45. Rotor mecanizado.	64
Figura 46. Proceso de mecanizado del Semianillo.	65
Figura 47. Semianillo Mecanizado.	65
Figura 48. Proceso de mecanizado del anillo.	66
Figura 49. Anillo mecanizado.	66
Figura 50. Eje y rotor montados en la máquina balanceadora.	67
Figura 51. Giroscopio Cardánico	68
Figura 52. Giroscopio Cardánico en ángulo.	68
Figura 53. Velocidad angular (rps) vs Frecuencia de precesión.	70
Figura 54. Velocidad angular (rps) vs Frecuencia de Nutación.	72

RESUMEN

En el presente proyecto se presenta la necesidad de ofrecer la oportunidad de realizar prácticas de experimentación y ensayos normativos obligatorios que el sector educativo, productivo industrial e investigativo de la provincia y del país actualmente requieren. Reforzando la enseñanza y que así los estudiantes puedan lograr una mejor comprensión de las leyes físicas que rigen los giroscopios.

El presente proyecto investigativo se enfocó en el diseño y construcción de un giroscopio para lo cual se efectuaron los estudios correspondientes con respecto a las dimensiones adecuadas del dispositivo en función del lugar donde será ubicado y los diseños disponibles en el mercado, posteriormente se procedió a realizar el diseño en un software para modelado mecánico, a continuación se realizaron los cálculos analíticos de diseño para verificar que el dispositivo resista sin sufrir fallas por fatiga del material debido a las fuerzas que ejerce el mismo. Una vez verificado se procedió a la construcción de cada uno de los elementos constituyentes del giroscopio para finalmente ensamblarlo.

Al finalizar el ensamblaje se realizaron las pruebas correspondientes verificando su correcto funcionamiento para así entregarlo al Laboratorio de Física de la Universidad Técnica de Ambato.

Palabras claves: Giroscopio, Diseño mecánico, Modelado mecánico, Experimentación, Fatiga.

ABSTRACT

This project presents the need to offer the opportunity to carry out the experimentation practices and mandatory regulatory tests that the educational, productive, industrial and research sectors of the province and the country currently require. Reinforcing teaching so that students can gain a better understanding of the physical laws governing gyroscopes.

The present research project focused on the design and construction of a gyroscope, for which the corresponding studies were carried out regarding the appropriate dimensions of the device according to the place where it will be located and the designs available in the market, afterwards the designs was carried out in a mechanical modeling software, then the analytical design calculations were performed to verify that the device resists without suffering material fatigue failures due to the forces exerted by it. Once verified, we proceeded the construction of each of the constituent elements of the gyroscope to finally assemble it.

At the end of the assembly, the corresponding tests were carried out to verify its correct operation in order to deliver it to the Physics Laboratory of the Technical University of Ambato.

Keywords: Gyroscope, Mechanical design, Mechanical modeling, Experimentation, Fatigue.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

Numerosas publicaciones fundamentales presentan amplia información sobre el giroscopio mecánico, que es un mecanismo que posee un disco giratorio. Las definiciones de un giroscopio lo describen como un dispositivo para medir o mantener la orientación basado en los principios del momento angular del disco giratorio. En las etapas iniciales de la historia de la mecánica, las propiedades específicas de los objetos en rotación fueron estudiadas por el famoso matemático Leonhard Euler (1707 – 1783), quien formuló las ecuaciones del movimiento de rotación de un cuerpo rígido alrededor de un punto de giro fijo. Su teoría del movimiento de los cuerpos rígidos (1765) se convirtió en una contribución fundamental a la teoría contemporánea de los giroscopios. El fenómeno de la conservación de la posición en el espacio inercial de un cuerpo auto equilibrado que gira rápidamente alrededor de su eje de simetría atrajo la atención de muchos científicos destacados, allanando el camino para la formulación de la conocida teoría del giroscopio [1].

La teoría del giroscopio se basa en una rama de la mecánica que trata del movimiento de un cuerpo rígido alrededor de un punto fijo. El desarrollo de la teoría de los cuerpos giratorios se produjo a partir de los trabajos de I. Newton (1642 – 1726), J.L.R. d'Alembert (1717 – 1783), Lagrange (1736 -1813), L. Poinsot (1777 – 1859), L. Foucault (1819 – 1868), S. D. Poisson (1781 – 1840), Lord Kelvin (1824 – 1907) entre otros famosos científicos e investigadores. El matemático francés P. S. Laplace (1749 – 1827) fue el primero que propuso algún tipo de girocompás insensible a un campo magnético. Otros brillantes científicos investigaron, desarrollaron y añadieron nuevas interpretaciones de los efectos giroscópicos, que se manifiestan en el mantenimiento persistente del plano de rotación [1].

La teoría aplicada del giroscopio surgió principalmente en el siglo XX; sin embargo, los primeros intentos de aplicación práctica de los giroscopios se hicieron mucho antes. En el siglo XIX, L. Foucault decidió demostrar la existencia de la rotación de la tierra en 1852

de forma experimental. Para ello colocó un cuerpo que giraba rápidamente, axialmente simétrico en una junta de cardán y lo llamó giroscopio. Sin embargo, no todos los resultados fueron convincentes debido a las dificultades técnicas y teóricas. Los principales retos se referían a la considerable fricción en los cojinetes de los anillos de suspensión cardánicos y la imperfección de un modelo matemático no daba la capacidad de describir los efectos giroscópicos. L. Foucault demostró la posibilidad de utilizar un giroscopio para determinar la línea del meridiano en cualquier latitud. Sin embargo, los problemas científicos y de ingeniería retrasaron las aplicaciones prácticas del girocompás, que aparecieron a principios de del siglo XX. Desde los experimentos de L. Foucault, la historia de los giroscopios desarrollados a lo largo del camino sugiere aumentar los pares de carga y aumentar la velocidad angular de los giroscopios [1].

Sin embargo, las teorías modernas del giroscopio no se han distinguido claramente de los principios teóricos formulados en siglos pasados. El principio de Euler sobre el cambio del momento angular del rotor giratorio basado en la conservación de la energía cinética, sigue considerándose fundamental [1].

La historia de los dispositivos giroscópicos es fascinante y apasionante para seguir su evolución. Las peonzas, los discos giratorios y sus variadas aplicaciones presentan las herramientas giroscópicas más sencillas (figura 1). Las peonzas se inventaron en diferentes civilizaciones y siguen llamando la atención por su comportamiento inusual y sus sorprendentes propiedades giroscópicas únicas. La peonza es uno de los juguetes más notables y reconocidos del mundo. Los científicos se han dado cuenta de la importancia de estudiar y comprender su giro y a partir de ahí, desarrollar un gran número de aplicaciones prácticas en ingeniería. Hasta la época contemporánea, numerosos dispositivos, incluyendo instrumentos de vuelo, el girocompás, el piloto automático, los dispositivos giroscópicos de estabilización y navegación para barcos, aviones, estaciones espaciales y satélites, utilizan ampliamente los giroscopios inerciales [1].



Figura 1. Peonzas y aplicaciones del giroscopio [1].

1.1.1. Fundamentación Teórica

1.1.1.1.El giroscopio

El giroscopio tiene importantes aplicaciones en ingeniería. Con un montaje en anillos de cardán como en la figura 2. El giroscopio está libre de momentos externos y su eje mantendrá una dirección fija en el espacio, independientemente de la rotación de la estructura a la que está unido. De este modo, el giroscopio se utiliza para sistemas de guía inercial y otros dispositivos de control direccional. Con la adición de una masa pendular al anillo interior del cardán, la rotación de la tierra hace que el giroscopio precese de manera que el eje de giro siempre apunte al norte, y esta acción constituye la base de la brújula giroscópica. El giroscopio también ha encontrado un importante uso como dispositivo estabilizador. La precesión controlada de un gran giroscopio montado en un barco se utiliza para producir un momento giroscópico que contrarreste el balanceo de un barco en el mar. El efecto giroscópico es también una consideración muy importante en el diseño de los rodamientos para los ejes de los rotores sometidos a precesiones forzadas [2].



Figura 2. Giroscopio con un montaje en anillos de cardán [2].

1.1.1.2. Giroscopio Mecánico

Un giroscopio mecánico presenta un sistema que contiene un disco o rotor de metal, montado universalmente con tres grados de libertad: libertad de giro en torno a un eje perpendicular a su centro; libertad de inclinación en torno a un eje horizontal perpendicular al eje de giro y libertad de giro en torno a un eje vertical perpendicular a los otros dos ejes. Los tres grados de libertad se obtienen montando el rotor en dos anillos pivotantes concéntricos llamados anillos interiores y exteriores o cardanes. El giroscopio de laboratorio presenta una construcción a la de la figura 3 [3].

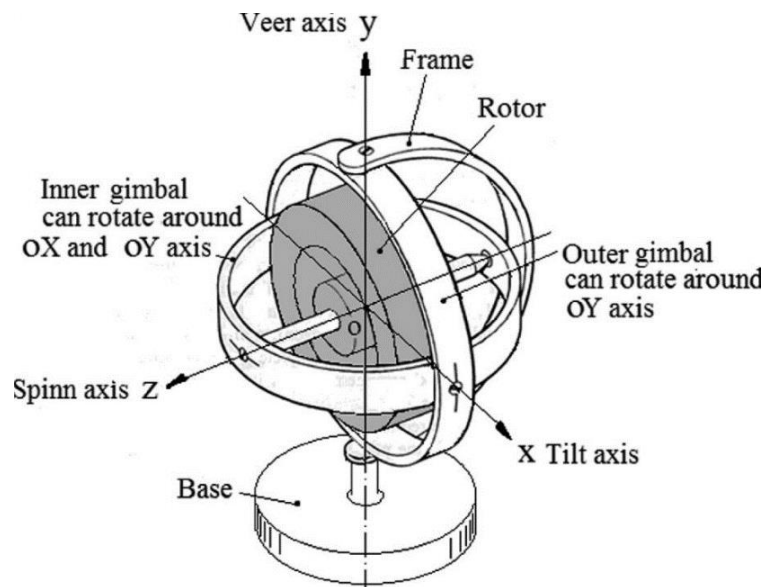


Figura 3. Giroscopio mecánico y sus componentes [4].

Todo el mecanismo ensamblado se conoce como sistema de cardán de un giroscopio libre o espacial [4].

El sistema de cardán está montado en un marco con soportes y base para que esté en su posición normal de funcionamiento. Todos los ejes de un giroscopio son perpendiculares entre sí y se cruzan en el centro de gravedad del rotor. Dicho giroscopio se denomina estático o equilibrado, mientras que, en caso contrario, se denomina pesado. El centro de gravedad del rotor puede estar en una posición fija o puede estar desplazado de un eje de oscilación. En este último caso, el centro de gravedad del rotor y su centro de suspensión no coinciden. Un rotor giratorio está encajado para girar alrededor de un eje, en el que éste define el eje de giro [4].

Los muñones del rotor están montados en un cardán interior; el cardán interior está juntado para oscilar en un cardán exterior para dos cardanes. El cardán exterior está montado sobre un pivote alrededor de un eje. Su diseño tiene los soportes en el marco situado en una base o plataforma. Este cardán exterior dispone de un grado de libertad de rotación mientras que su eje no posee ningún grado de libertad. El siguiente cardán interior está montado en el cardán exterior del giroscopio para pivotar sobre un eje en su plano, que es siempre perpendicular al eje pivotante del cardán exterior del giroscopio. Este cardán interior tiene dos grados de libertad de rotación. El rotor giratorio responde a una fuerza aplicada en torno al eje de entrada mediante fuerzas de reacción en torno al eje de salida. El rotor giratorio que está montado en un conjunto de cardanes puede girar simultáneamente alrededor de los otros dos ejes y es libre de girar en cualquier dirección alrededor del punto fijo. Por lo tanto, si los cardanes se inclinan en cualquier dirección, el rotor giratorio permanece en el plano original. Esta peculiaridad del diseño del giroscopio se utiliza para medir los ángulos de actitud de cabeceo, balanceo y guiñada en un avión, barcos y otros [5].

El giroscopio manifiesta varias propiedades interesantes, que pueden observarse en cuerpos celestes en rotación, proyectiles o proyectiles de artillería, trompos, rotores de turbinas en aeronaves, barcos y otros mecanismos y máquinas. El movimiento forzado del giroscopio genera pares de resistencia y precesión. El último expresa el movimiento que

se llama precesión. La acción del sistema de pares de inercia representa los movimientos de rotación alrededor de los ejes se denomina efectos giroscópicos. El sistema no exhibirá ningún efecto giroscópico a menos que el rotor esté girando. Si se hace que el rotor gire a alta velocidad y se desplace alrededor de su eje, entonces los pares del rotor manifiestan propiedades de giroscopio válidas que poseen funciones fundamentales esenciales. La orientación del dispositivo giroscópico permanece casi fija, independientemente del movimiento de la plataforma de montaje [6].

La orientación permanente de un giroscopio en el espacio se manifiesta cuando se cumplen las siguientes condiciones: se aplica un par externo al rotor giratorio del giroscopio y el eje de rotación del giroscopio debe ser capaz de cambiar su orientación en el espacio [6].

Si el giroscopio está sujeto a un par externo que tiende a girar alrededor del algún eje, el par externo genera varios pares de inercia del rotor giratorio. Estas condiciones demuestran las siguientes propiedades:

- El eje del rotor oz del giroscopio comienza a girar (precesión) en una dirección de ángulo recto al par externo.
- Simultáneamente, el giroscopio, así como sus cardanes, comienzan a girar alrededor de los ejes ox y oy pero con diferentes velocidades angulares y aceleraciones menores.
- El rotor giratorio del giroscopio se resistirá a cambiar la ubicación de su eje. Si cesa la acción del par externo, entonces la precesión cesa simultáneamente.
- El eje del giroscopio puede manifestar nutación, que consiste en oscilaciones pequeñas pero rápidas del eje aproximadamente en su posición media. Las oscilaciones lentas de los giroscopios con grandes amplitudes se denominan galope.

Propiedades giroscópicas a partir de varios dispositivos e instrumentos que se aplican ampliamente en la tecnología de ingeniería moderna para lo siguiente: determinación del horizonte o meridiano geográfico; medición de movimientos de traslación y velocidades angulares de objetos en movimiento y para muchos otros fines. La propiedad giroscópica se utilizó para los girocompases que pasaron en su diseño de construcciones simples a complejas y perfectas. Los girocompases fueron diseñados en diferentes países

industriales por los siguientes investigadores: J. Serson (1743), G. J. Bohnenberg (1817), W. R. Johnson (1832), M. G. van den Bos (1885), Obri (1898), H. Anschütz – Kaempfe (1908) y E. Sperry (1911) [7], [8].

Tras las continuas mejoras de estos tipos de girocompases, llegaron los modernos dispositivos que sustituyen a las brújulas magnéticas en barcos, aviones, naves espaciales y vehículos en general. Un girocompás es el instrumento giroscópico aeronáutico más antiguo que apunta en una dirección geográfica norte. La rotación de un avión sobre el giroscopio se transmite en una escala de 360 grados [8].

Actualmente, los giroscopios se aplican ampliamente en sistemas de control de objetos voladores y estabilizadores giroscópicos. A medida que la aviación continúa desarrollándose, los giroscopios verticales y los giroscopios de curso se utilizaron comúnmente como instrumentos de pilotaje necesarios para vuelos sin ninguna referencia visual externa en tierra. El giroscopio mecánico es el más conocido en ingeniería y todavía tiene una amplia aplicación como instrumento de vuelo y sistema de navegación [8].

1.1.1.3. Giroscopios modernos

Los nuevos giroscopios en los que los principios físicos son diferentes sustituyen a los giroscopios mecánicos porque poseen mejores características técnicas [9].

Actualmente, los giroscopios están representados por diferentes diseños, desde los mecánicos hasta los sistemas láser, ópticos, de cuarzo y de integración, con diversas características técnicas y principios físicos de funcionamiento. Todos los grupos de giroscopios se diferencian por las leyes de funcionamiento, las mejoras en los diseños en términos de rendimiento y el coste. Los diversos indicadores de los giroscopios determinan su alcance en las industrias. La figura 4 muestra las características del giroscopio, su factor de estabilidad en función de la estabilidad del sesgo, cuyo problema principal está relacionado con el error de medición de la velocidad angular [9], [10].

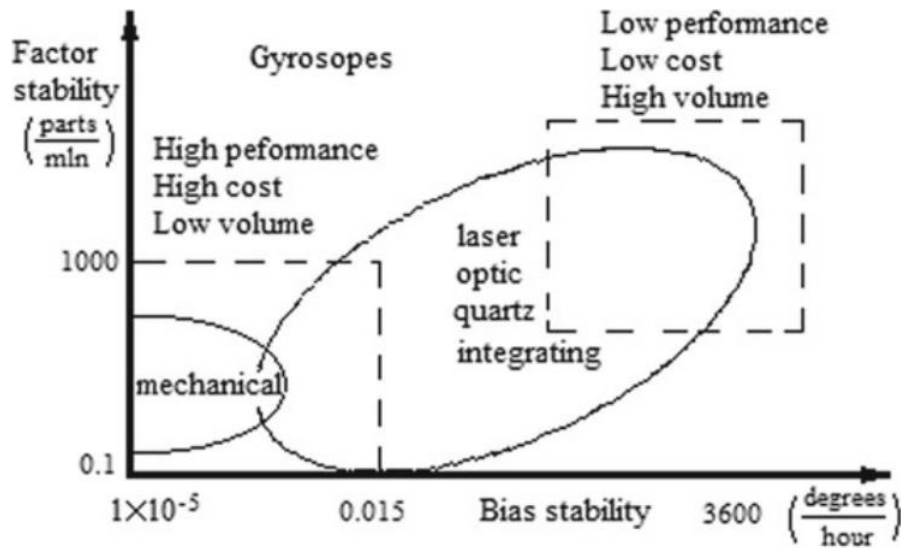


Figura 4. Factor de estabilidad en función de la estabilidad del sesgo de los giroscopios [10].

Los giroscopios extremadamente sensibles se basan en principios de funcionamiento electrónicos, sistemas micro electromecánicos con anillo vibratorio, fibra óptica, laser, piezoeléctricos, de horquilla y sistemas integradores [10].

La observación de los diferentes diseños y propiedades del giroscopio permite resumir las aplicaciones de este dispositivo en la ingeniería. Las fuerzas y movimientos que actúan en el giroscopio se calculan para los dispositivos de control direccional, como reacciones en los rodamientos de cualquier vehículo en movimiento con componentes giratorios como motores a reacción, motores eléctricos, discos giratorios, etc. El cambio de dirección de los dispositivos giroscópicos en el espacio genera pares de inercia del rotor giratorio que actúan sobre otros componentes de diseño. La acción de los pares de inercia resulta en los movimientos de los dispositivos giroscópicos que deben ser calculados. Estos cálculos permiten utilizar modelos matemáticos de los movimientos y pares generados por las fuerzas de inercia del rotor giratorio [10].

1.1.1.4.Principios Básicos de la Ingeniería Mecánica acerca de los Efectos

Giroscópicos

La teoría del giroscopio se basa en modelos matemáticos que describen las fuerzas y movimientos que actúan sobre el giroscopio mediante los principios fundamentales de la mecánica clásica. La mecánica clásica considera las interrelaciones de los principales conceptos que son fuerza, masa y movimiento. Las leyes del movimiento de Newton y la primera que relaciona las magnitudes cinemáticas y dinámicas representan la independencia de estos conceptos físicos. La mecánica newtoniana se basa en los siguientes conceptos: las leyes del movimiento son solamente válidas para un sistema de referencia inercial, el equilibrio del momento y el principio de reacción. Las leyes de Newton se derivan de las tres leyes que son la conservación de la energía, el momento y el momento angular que son conceptos centrales de la teoría del giroscopio [11].

Los principios fundamentales de la mecánica clásica permiten formular problemas de la teoría del giroscopio mediante precisos modelos mecánicos y matemáticos. Las leyes de la mecánica clásica se basan en ecuaciones gobernantes que se representan en la teoría del giroscopio mediante el análisis vectorial de las fuerzas, velocidades y aceleraciones del giroscopio, las ecuaciones de equilibrio de la masa, la conservación del momento angular y la energía. Por lo tanto, el giroscopio, cuyo componente principal es el rotor giratorio, tiene masa, produce fuerzas y las mismas leyes, principios y definiciones que se mencionan anteriormente describen los movimientos [12].

Las cantidades físicas se utilizan para la descripción cualitativa y cuantitativa de los efectos giroscópicos. Estas representan propiedades medibles de elementos físicos. Todo valor específico de una cantidad puede escribirse como el producto de un número y una unidad. Las magnitudes de base se definen de forma independiente de manera que todas las magnitudes se derivan por multiplicación o división. Las magnitudes físicas se presentan en el Sistema Internacional de Unidades (SI) documentado por ISO 1000. Las unidades básicas del SI forman un conjunto de dimensiones mutuamente independientes, tal y como exige el análisis dimensional comúnmente empleadas en ciencia y tecnología [12]. Las magnitudes físicas fundamentales aplicadas a la teoría del giroscopio están representadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Magnitudes físicas fundamentales de las unidades del SI aplicadas en la teoría del giroscopio.

Cantidad base		Símbolo	Unidad base (SI)	Dimensión
Longitud		l	Metro (m)	L
Ángulo de plano		θ	Radianes (rad), grados	1
Masa		m	Kilogramos (kg)	M
Tiempo		t	Segundos (s)	T
Velocidad	Lineal	\vec{v}	m/s	LT^{-1}
	Angular	ω	rad/s	T^{-1}
Aceleración	Lineal	\vec{a}	m/s^2	LT^{-2}
	Angular	ω_a	rad/s^2	T^{-2}
Fuerza		F	Newton (N = kg m s ⁻²)	MLT^{-2}
Torque		T	Newton – metro (N m)	ML^2T^{-2}
Energía		E	Joule (J)	ML^2T^{-2}
Trabajo		W	Joule (J)	ML^2T^{-2}
Potencia		P	Watt (W)	ML^2T^{-3}
Momento de inercia		I	$kg\ m^2$	ML^2
Momento angular		L	$kg\ m^2/s$	ML^2T^{-1}
Área		A	A	L^2
Volumen		V	V	L^3
Peso		w	W	MLT^{-2}

La complejidad de las fuerzas y movimientos que actúan sobre los dispositivos giroscópicos está representada por la teoría del giroscopio que se formula sobre las siguientes leyes fundamentales y principios de la ingeniería mecánica. Las ecuaciones matemáticas expresan los principios y reglas que se aplican en la teoría del giroscopio [12].

Concepto de la velocidad y aceleración.

La velocidad y la aceleración son conceptos esenciales de la cinemática, la rama de la mecánica clásica que describe el movimiento de un objeto. La velocidad de un objeto es la tasa de cambio de su posición respecto a un marco de referencia y es una función del tiempo, es una magnitud física vectorial; para definirla se necesita tanto la magnitud como la dirección y esta se expresa para dos tipos de movimientos que son lineales y angulares [13].

La velocidad lineal se representa de la siguiente manera:

$$v = s/t, (\text{m/s}), [LT^{-1}] \quad (1)$$

Donde s es la distancia, t es el tiempo.

La velocidad angular de un objeto es la tasa de cambio temporal de su desplazamiento angular con respecto al origen [13]. La velocidad angular se representa de la siguiente manera:

$$\omega = \gamma/t, (\text{rad/s}), [T^{-1}] \quad (2)$$

Donde γ es el ángulo, t es el tiempo.

La aceleración es la tasa de cambio de la velocidad de un objeto con respecto al tiempo, es una magnitud física vectorial; se necesita tanto la magnitud como la dirección para definirla, esta se expresa para dos tipos de movimientos que son lineales y angulares [13].

La aceleración se expresa se la siguiente manera:

$$a = v/t, (\text{m/s}^2), [LT^{-2}] \quad (3)$$

La aceleración angular se representa de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \omega/t, (\text{rad/s}^2), [T^{-2}] \quad (4)$$

Donde ω es la velocidad angular, t es el tiempo.

La aceleración radial, tangencial y angular del movimiento circular.

El movimiento circular uniforme es un ejemplo de un cuerpo que experimenta una aceleración que resulta en la velocidad de magnitud constante pero el cambio de dirección.

En este caso, debido a que el curso del movimiento del objeto cambia continuamente, al ser tangencial al círculo, el vector velocidad lineal del objeto también varía, pero su velocidad no. Esta aceleración es una aceleración radial que se dirige hacia el centro del círculo y toma la magnitud [13]. La aceleración radial se representa de la siguiente manera:

$$a_n = v^2/r, (m/s^2), [LT^{-2}] \quad (5)$$

Donde v es la velocidad lineal del objeto a lo largo de la trayectoria circular de radio r . Equivalentemente, el vector de aceleración radial puede calcularse a partir de la velocidad angular del objeto:

$$a_n = -r\omega^2, (m \text{ rad}/s^2), [LT^{-2}] \quad (6)$$

Donde r es un vector dirigido desde el centro del círculo e igual en magnitud al radio. El negativo muestra que el vector de aceleración se dirige hacia el centro del círculo (opuesto al radio) [13].

Con un movimiento circular no uniforme, se produce una aceleración tangencial igual a la tasa de cambio de la velocidad angular alrededor del círculo por el radio del mismo [13].

La aceleración tangencial se representa de la siguiente manera:

$$a_t = r\varepsilon, (m \text{ rad}/s^2), [LT^{-2}] \quad (7)$$

La aceleración tangencial se dirige en ángulo recto al radio vector y toma el signo de la aceleración angular [12], [13].

Segunda ley de Newton

Todo objeto en estado de movimiento uniforme tiende a permanecer en ese estado de movimiento a menos que se le aplique una fuerza externa; la relación entre la masa de un objeto m (kg), su aceleración a (m/s^2) y la fuerza aplicada o de inercia F (N) es el producto de una masa y una aceleración [14].

$$F = ma, (N = kg \text{ m}/s^2), [MLT^{-2}] \quad (8)$$

La aceleración y la fuerza son vectores, cuya dirección es la misma; para cada acción hay una reacción igual y opuesta. La segunda ley de Newton se aplica a una amplia gama de fenómenos físicos, donde la fuerza es la fuerza externa neta [14].

Concepto de momento de inercia rotacional

El momento de inercia rotacional de un cuerpo rígido determina el par necesario para una aceleración angular deseada en torno a un eje de rotación. Depende de la distribución de la masa del cuerpo y del eje que se elija. El momento de inercia rotacional del objeto, J , se define como la relación entre un par aplicado T y la aceleración angular ε a lo largo del eje principal del objeto, $T = J\varepsilon$. El momento de inercia del objeto J es el producto de la masa m y el radio r al cuadrado [14].

$$J = mr^2, (kg\ m^2), [ML^2] \quad (9)$$

Donde r es el radio de giro.

Concepto del teorema del eje paralelo del momento de inercia de la masa

La ecuación del teorema del eje paralelo define el momento de inercia de la masa del objeto respecto a un eje paralelo alternativo. La siguiente ecuación presenta las transferencias de un eje paralelo de la ecuación del momento de inercia de la masa desde el eje “ i ” a un eje “ x ” paralelo:

$$J_x = J_i + ml^2, (kg\ m^2), [ML^2] \quad (10)$$

Donde l es la distancia perpendicular entre los dos ejes paralelos, los demás parámetros fueron especificados anteriormente [14].

Concepto de conservación del momento angular

La conservación del momento angular es una propiedad física de un sistema que gira, de modo que su giro permanece constante a no ser que actúe sobre él un par de torsión externo. El vector momento angular de una partícula puntual es paralelo y directamente proporcional al vector velocidad angular ω de la partícula, donde la constante de proporcionalidad depende tanto de la masa de la partícula y de su distancia de origen. El momento angular total de cualquier objeto rígido contiene dos componentes principales:

el momento angular del centro de masa entorno al origen, más el momento angular de giro del objeto en torno al centro de masa. El torque puede definirse como la tasa de cambio del momento angular. El momento angular es un vector y una medida de la cantidad de rotación que tiene un objeto, teniendo en cuenta su masa, forma y velocidad. Para un cuerpo rígido que gira alrededor de un eje de simetría, el momento angular H se expresa como el producto del momento de inercia J del cuerpo y su velocidad angular ω . El momento angular representa el producto de un momento de inercia y la velocidad angular alrededor de un eje particular [14].

$$H = J\omega, (kg \ m^2 \ rad/s), [ML^2T^{-1}] \quad (11)$$

Donde J es el momento de inercia del objeto.

Concepto de fuerza centrífuga

La fuerza centrífuga es una fuerza de inercia dirigida hacia afuera del eje de rotación y que parece actuar sobre todos los objetos cuando se ven en un marco de referencia de rotación [14]. La ecuación de la fuerza centrífuga para el objetivo del movimiento circular es la siguiente:

$$F = ma = m\omega^2 r = mv^2/r, (N = kg \ m \ s^{-2}), [MLT^{-2}] \quad (12)$$

Concepto de aceleración y fuerza de Coriolis

La fuerza de Coriolis es una fuerza de inercia que actúa sobre los objetos que están en movimiento respecto a un marco de referencia en rotación. Las leyes del movimiento de Newton describen el movimiento de un objeto en un marco de referencia inercial (sin aceleración). Cuando las leyes de Newton se transforman en un marco de referencia giratorio, aparece la fuerza de Coriolis y la fuerza centrífuga. Ambas fuerzas son proporcionales a la masa del objeto. La fuerza de Coriolis es equivalente a la tasa de rotación, y la fuerza centrífuga es proporcional al cuadrado de la tasa de rotación. La fuerza de Coriolis actúa en dirección perpendicular al eje de rotación y a la velocidad del cuerpo en el marco de rotación. Es proporcional a la velocidad del objeto en el marco de rotación. La fuerza centrífuga actúa hacia el exterior en la dirección radial y equivale a la distancia del cuerpo al eje del marco giratorio. Estas fuerzas adicionales se denominan fuerzas de inercia [14].

En términos no vectoriales: la magnitud de la aceleración de Coriolis del objeto es proporcional a la velocidad del objeto y al seno del ángulo entre el movimiento del objeto y el eje de rotación [14].

La fórmula vectorial para la magnitud y la dirección de la aceleración de Coriolis se deriva mediante el análisis vectorial y se presenta mediante la expresión [14].

$$a_c = -2v\omega, (m/s^2), [LT^{-2}] \quad (13)$$

Donde a es la aceleración de la partícula en el sistema de rotación, v es la velocidad de la partícula en relación con el sistema de rotación y ω es el vector de velocidad angular que tiene una magnitud igual a la tasa de rotación, con una dirección a lo largo del eje de rotación del sistema de referencia giratorio [14].

La ecuación puede multiplicarse por la masa del objeto en cuestión para obtener la fuerza de Coriolis:

$$F_c = -ma_c = -2v\omega m, (kg m/s^2), [MLT^{-2}] \quad (14)$$

El efecto Coriolis es el comportamiento añadido por la aceleración de Coriolis. La fórmula implica que la aceleración de Coriolis es perpendicular tanto a la dirección de la velocidad de la masa en movimiento y al marco del eje de rotación [14].

El principio de conservación de la energía mecánica

En las ciencias físicas la energía mecánica es la suma de la energía potencial y la energía cinética. Esta es la energía asociada al movimiento y a la posición de un objeto. El principio de conservación de la energía mecánica establece que en un sistema aislado que solo está sometido a fuerzas conservativas, la energía mecánica es constante. Si un objeto se mueve en la dirección opuesta a una fuerza neta conservadora, la energía potencial aumentará y si la velocidad del objeto cambia, la energía cinética del objeto cambia también. En todos los sistemas reales, las fuerzas de fricción y otras fuerzas no conservativas están presentes. La diferencia entre una fuerza conservativa y una no conservativa es que cuando una fuerza conservativa mueve un objeto de un punto a otro, el trabajo realizado por la fuerza conservativa es independiente de la trayectoria. Por el

contrario, cuando una fuerza no conservativa actúa sobre un objeto, el trabajo realizado por la fuerza no conservativa depende de la trayectoria [14].

Las leyes de conservación de la mecánica clásica incluyen la conservación de la energía mecánica, la conservación del momento lineal y la conservación del momento angular. Una ley de conservación se expresa matemáticamente como una ecuación de continuidad, una ecuación diferencial parcial que da una relación entre el monto de la cantidad y el “transporte” de esa cantidad. La energía es una cantidad escalar, y la energía mecánica de un sistema es la suma de la energía potencial y cinética. La energía potencial es medida por la posición de las partes del sistema. La energía cinética es la energía del movimiento [14].

$$E_m = U + K, (J = ml^2/t^2), [ML^2T^{-2}] \quad (15)$$

La energía potencial, U , depende de la posición de un objeto sometido a una fuerza conservativa. Se define como la capacidad del objeto para realizar un trabajo y aumenta a medida que el objeto se mueve en la dirección opuesta a la fuerza. Los tipos más comunes de energía potencial incluyen la energía potencial gravitacional de un objeto que depende de su masa y su distancia al centro de masa de otro objeto y la energía potencial elástica de un resorte extendido [14].

$$U = mgh, (kg (m/s^2) m) o (N m), [ML^2T^{-2}] \quad (16)$$

Donde m es la masa del objeto, g es la aceleración de la gravedad y h es la posición en altura del objeto. La dimensión de la energía es $N m = \text{Joule}$ [14].

La energía potencial de un resorte lineal ejerce una fuerza $F = (-kx, 0, 0)$ que es proporcional a su deformación en la dirección x [14]. La función de la energía potencial de un resorte lineal es:

$$U_x = -(1/2)kx^2, (N m), [ML^2T^{-2}] \quad (17)$$

La energía potencial elástica surge como consecuencia de una fuerza que intenta devolver el objeto a su forma original. Si el estiramiento se libera, la energía se transforma en energía cinética [14].

La energía cinética, K , de un objeto es la energía que posee debido a su movimiento. Se define como el trabajo necesario para acelerar un objeto de una masa determinada desde el reposo hasta su velocidad inicial. El objeto mantiene esta energía cinética a menos que su velocidad cambie. El objeto realiza la misma cantidad de trabajo al desacelerar desde su velocidad actual a un estado de reposo. La energía cinética de un objeto rígido que no gira depende de su masa y de su velocidad. Se define como la mitad del producto de la masa del objeto por el cuadrado de su velocidad [14].

$$K = (1/2) m v^2, (N m), [ML^2T^{-2}] \quad (18)$$

Donde m es la masa y v es la velocidad del objeto.

Si un cuerpo rígido gira en torno a una línea cualquiera que pasa por el centro de masa, entonces tiene una energía cinética de rotación que es simplemente la suma de las energías cinéticas de sus partes en movimiento y viene dada por:

$$K = (1/2) (m r^2) \omega^2 = (1/2) J \omega^2, (N m), [ML^2T^{-2}] \quad (19)$$

Donde ω es la velocidad angular del cuerpo; r es la distancia de cualquier masa a esa línea; J es el momento de inercia del cuerpo [14].

En esta ecuación, el momento de inercia debe tomarse en torno a un eje que pasa por el centro de masa, y la rotación medida por ω debe ser alrededor de ese eje; existen ecuaciones más generales para los sistemas en los que el objeto se tambalea debido a su forma excéntrica. Los objetos en reposo no tienen energía cinética [14].

Concepto del trabajo

El trabajo es la energía asociada a la acción de una fuerza. Es un desplazamiento del objeto de aplicación en la dirección de la fuerza. Se calcula como el producto de la fuerza y la distancia por la que el cuerpo se mueve [14]. La fórmula para calcular el trabajo es la siguiente:

$$W = F s, (N m), [ML^2T^{-2}] \quad (20)$$

Donde F es la fuerza; s es la distancia.

Concepto de potencia

Potencia es la tasa de realización de trabajo o la tasa de utilización de la energía, que es numéricamente lo mismo. El trabajo (joule) en un segundo es la potencia (watts) [14]. La fórmula para calcular la potencia es:

$$P = W/t = (J/s), [ML^2T^{-3}] \quad (21)$$

Donde t es el tiempo.

Los axiomas de la ingeniería mecánica se formulan como leyes de equilibrio o leyes de conservación para cantidades mecánicas como la masa, energía, etc. Y se establecen como ecuaciones de integrales sobre el objeto material o como ecuaciones locales. Estas ecuaciones fundamentales se formulan en la forma de Euler, lo que significa que todas las cantidades se expresan como funciones de las coordenadas de un punto material en la configuración real. La energía cinética y el trabajo externo aplicados a un giroscopio, el postulado del equilibrio de la energía mecánica, puede formularse de la siguiente manera: la tasa de tiempo real de la energía total de un objeto es igual a la suma de la tasa de trabajo realizado por las fuerzas externas que actúan sobre un giroscopio. El equilibrio de la energía mecánica presenta el problema que formuló el sistema donde todas las fuerzas están equilibradas [14].

El principio del trabajo virtual para un cuerpo rígido en el espacio se presenta mediante la restricción de rigidez que expresa que todas las fuerzas actuantes deben ser cero. Las ecuaciones de equilibrio energético de las fuerzas que actúan en el giroscopio representan principios extremos para cantidades de tipo energético como el trabajo, la energía cinética, etc. En ingeniería, una ecuación constitutiva es una relación entre dos magnitudes físicas que son específicas de un objeto y que aproximan la respuesta de ese objeto sobre las fuerzas aplicadas. Estas se combinan con otras ecuaciones que rigen las leyes físicas para resolver problemas físicos como la conexión entre las fuerzas aplicadas y los movimientos [14].

Todas las leyes presentadas anteriormente con sus ecuaciones son universales y válidas para el giroscopio. Los efectos giroscópicos se basan en la relación específica y determinista entre las fuerzas que actúan y los movimientos. Una práctica común en

mecánica es aceptada como se describe: las fuerzas que actúan son variables independientes, y los movimientos son las variables dependientes. Las fuerzas completamente externas e internas que actúan y son invariantes determinan los movimientos del giroscopio, en un instante de tiempo específico. Este principio supone restricciones sustanciales a los efectos giroscópicos que permiten generar movimientos de magnitud definida al sistema inercial [14].

Movimiento Giroscópico

Uno de los problemas más interesantes de Dinámica es el del movimiento giroscópico. Este movimiento se produce siempre que el eje sobre el que gira un cuerpo gira a su vez sobre otro eje. Aunque la descripción completa de este movimiento implica una complejidad considerable, los ejemplos más comunes y útiles de movimiento giroscópico se producen cuando el eje de un rotor que gira a una velocidad constante, gira (precesa) alrededor de otro eje a una velocidad constante.

El momento cinético es el momento de la cantidad de movimiento y es conservativo. Para rotación pura de un disco corresponde:

$$H_o = I_o w \quad (22)$$

Donde:

I_o = Momento de inercia de masa.

w = Velocidad angular.

Teorema general del momento cinético

$$\Sigma M_o = \frac{dH_o}{dt} \quad (23)$$

El momento cinético H_o es un vector perpendicular al giro w .

Los vectores que se usen de aquí en adelante siguen la regla del sacacorchos, es decir, el vector es positivo si gira en sentido anti horario (el tornillo sale) y es negativo si gira en sentido horario (el tornillo entra).

Para comprender mejor el efecto giroscópico puede ser de gran ayuda observar que, cuando se aplica un momento M perpendicular al momento cinético H_z sorpresivamente se produce una precesión (giro alrededor del eje X) del disco situado a una distancia \bar{r} del centro.

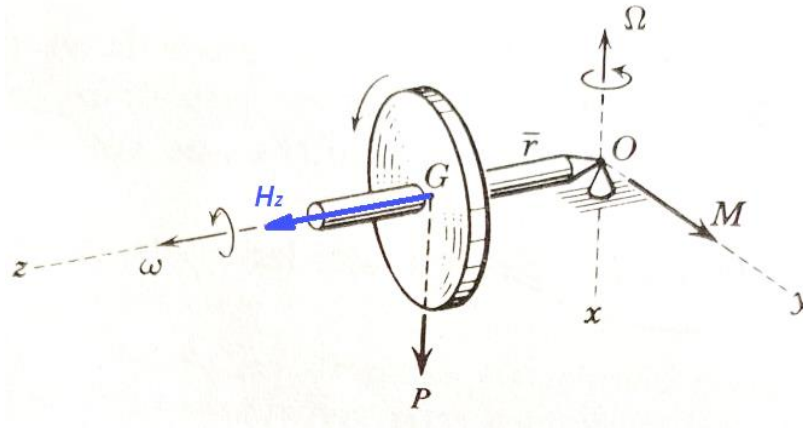


Figura 5. Interpretación de la ecuación giroscópica [2].

En la mayoría de aplicaciones técnicas del giroscopio, el momento M , y los ejes de giro y de precesión son mutuamente perpendiculares, o lo que es lo mismo M, H, Ω son perpendiculares entre sí como se puede observar en la figura 5.

Del teorema del momento cinético se deduce la ecuación que gobierna el funcionamiento de este sistema, de acuerdo con este teorema la variación del momento cinético dH_z debe tener el mismo valor y sentido que el impulso angular Mdt aplicado, entonces:

$$Mdt = dH_z = I \omega d\phi \quad (24)$$

Que dividiendo para dt se tiene:

$$M = I \Omega \omega \quad (25)$$

$$M = P\bar{r} \quad (26)$$

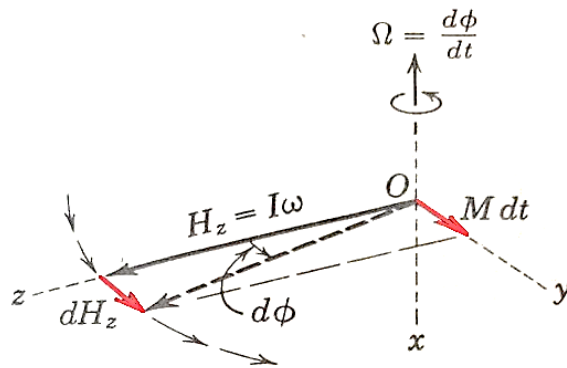


Figura 6. Análisis vectorial del giroscopio [2].

I, Ω, ω son el momento de inercia de masa del disco, la velocidad angular de precesión y la velocidad angular del disco respectivamente. Al momento M se le llama par giroscópico.

De la ecuación 22 se desprende que la velocidad de precesión respecto a la vertical es independiente del ángulo entre el eje del rotor y la vertical, es decir, que la velocidad de precesión respecto a la vertical es la misma cualquiera que sea el valor de dicho ángulo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir un giroscopio para el Laboratorio de Física de la Carrera de Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Investigar acerca de las leyes físicas que rigen el dispositivo, su funcionamiento y diseños.
- Determinar los parámetros requeridos para el diseño de un giroscopio.
- Diseñar un modelo funcional y que permita la realización de prácticas estudiantiles en los Laboratorios de Física de la Carrera de Mecánica.
- Construir el giroscopio previamente diseñado.
- Evaluar el funcionamiento del giroscopio construido e implementar el dispositivo finalizado, reforzando el equipamiento de los Laboratorios de la Carrera de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

Charles S. Herrman en su paper “Fundamentos de la Metodología” define la misma como: Una estructura normalmente conceptual que, tanto por ser coherente e internamente consistente, como por estar compuesta por una plantilla de principios hipotéticos y/o aceptados, se emplea para analizar y/u organizar datos a partir de los cuales discernir o atribuir razonablemente un principio básico común dentro del analizado que puede permitir el desarrollo o la validación lógica de los postulados teóricos [15].

Para el presente proyecto se dará uso del método científico, entendiendo el mismo como un conjunto de procedimientos lógicos y consecuentes, con el objetivo de encontrar la solución a un problema y finalmente verificar o demostrar la verdad de un conocimiento. El tipo de investigación utilizado es el de proyecto técnico, con un enfoque cuantitativo cuyo medio principal es la medición y el cálculo lo que es fundamental para investigaciones de tipo descriptivo, explicativo y exploratorio [16].

El presente capítulo detalla la selección de los materiales correspondientes y los equipos necesarios para su fabricación.

2.1. Materiales

Acero Inoxidable (AISI 304)

Es un acero Inoxidable austenítico al cromo – níquel con bajo contenido de carbono. Resiste a la corrosión intercrystalina hasta 300 °C. Resiste al efecto corrosivo del medio ambiente, vapor, agua y ácidos, así como de soluciones alcalinas, si se emplea con la superficie pulida espejo [17].

Algunas de sus aplicaciones son en industrias alimenticias, cervecera, azucarera, utensilios domésticos, industria del cuero, farmacéutica, dental, entre otras [17].

Tabla 2. Propiedades Mecánicas del acero AISI 304.

PROPIEDADES MECÁNICAS			
Resistencia Mecánica (<i>N/mm²</i>)	Punto de Fluencia (<i>N/mm²</i>)	Elongación %Min.	Dureza Rockwell B
520	220	20	249 - 178

Acero de Transmisión (AISI 1018)

Es un acero de cementación no aleado principalmente utilizado para la elaboración de piezas pequeñas, exigidas a desgaste y donde la dureza del núcleo no es muy importante. Algunas de sus aplicaciones son para el diseño de levas, uniones, bujes, pines, pivotes, pernos grado 3 [17].

Tabla 3. Propiedades Mecánicas del acero AISI 1018.

PROPIEDADES MECÁNICAS			
Resistencia Mecánica (<i>N/mm²</i>)	Punto de Fluencia (<i>N/mm²</i>)	Elongación %Min.	Dureza Rockwell B
410 – 520	235	20	143

Aluminio

El aluminio junto con sus aleaciones se distingue por poseer una densidad baja, de 2.7 g/cm^3 , alta conductividad térmica y eléctrica, buena resistencia a la corrosión, además es muy dúctil permitiendo transformarlo en finas láminas de papel aluminio. Posee una temperatura de fusión de 660°C , que se cataloga como baja y limita su campo de aplicación a elevadas temperaturas [18].

Tabla 4. Constantes físicas del Aluminio.

CONSTANTES FÍSICAS			
Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo de rigidez (GPa)	Relación de Poisson ν	Peso específico w (kN/m^3)
71.7	26.9	0.333	26.6

Bronces

Estos son aleaciones de cobre y estaño, siendo factible también alearse con silicio, níquel y aluminio. Este tipo de aleaciones poseen más resistencia que los latones y tienen una alta resistencia a la corrosión [18].

Tabla 5. Constantes físicas del Bronce fosforado.

CONSTANTES FÍSICAS			
Módulo de elasticidad (GPa)	Módulo de rigidez (GPa)	Relación de Poisson ν	Peso específico w (kN/m^3)
111	41.4	0.349	80.1

Rodamientos Rígidos de Bolas

Este tipo de rodamientos son particularmente versátiles. Su diseño es simple, no son desarmables, funcionan a velocidades altas y muy altas, son resistentes y requieren poco mantenimiento. Son los más utilizados, por lo que existen disponibles diversos diseños, versiones y tamaños.

Rodamientos Cerámicos de bolas de precisión.

En comparación con el acero, los materiales cerámicos destacan por sus mejores y particulares características como resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, aislamiento eléctrico, no magnéticos, alta resistencia, alta rigidez y bajo peso específico. Estas propiedades los cualifican para sustituir al acero y hacer que los rodamientos sirvan en condiciones de mayor velocidad, ambiente duro y

menos lubricación, también disminuyen el desgaste, el ruido, la vibración y el tiempo de mantenimiento de los rodamientos, dando como resultado un aumento en el rendimiento, la fiabilidad y la vida útil de los mismos.



Figura 7. Rodamientos cerámicos de bolas de precisión.

Motor eléctrico

Los motores eléctricos convencionales crean movimiento mecánico de rotación como resultado de las fuerzas magnéticas que actúan sobre las corrientes eléctricas. Los motores eléctricos más conocidos son los monofásicos debido a que se utilizan en aparatos domésticos y en herramientas portátiles. Existen varios tipos de motores monofásicos en el mercado, cada uno diseñado para satisfacer una aplicación específica [19].



Figura 8. Motor eléctrico.

2.1.1. Equipos

Los equipos requeridos para la fabricación del dispositivo se detallan a continuación.

Ordenador portátil

Es un dispositivo informático de fácil transporte, requerido para el modelado mecánico en software CAD, realización de simulaciones en caso de ser necesario y para la elaboración de planos de construcción.

Torno

Es una máquina que se utiliza para el mecanizado de piezas, es una máquina - herramienta altamente versátil, que con suficiente destreza permite la realización de operaciones muy diversas como: torneado de formas, roscado, refrentado, taladrado y cilindrado.

El sistema de operación consiste en hacer rotar una pieza y mediante la utilización de una cuchilla se realiza el mecanizado. Los más comunes son los tornos paralelos debido a su elevada utilización [20].



Figura 9. Torno paralelo de precisión.

Máquina balanceadora

Es una herramienta de medición utilizada para equilibrar piezas de máquinas rotativas como: rotores de motores eléctricos, frenos de disco, turbinas, ventiladores, hélices entre otras.

La pieza es sujeta a la plataforma y se hace girar. Al girar, la vibración de la suspensión es detectada mediante sensores y esa información se utiliza para determinar la cantidad de desequilibrio de la pieza. Junto con la información de la fase, la máquina puede determinar cuánto y donde añadir o quitar pesos para equilibrar la pieza [20].



Figura 10. Máquina balanceadora.

Equipo de soldadura SMAW

Los equipos de soldadura SMAW usan electrodos revestidos para unir acero al carbono, acero de baja aleación, acero inoxidable, fundiciones de hierro y metales en general.

La unión se consigue mediante la fundición del electrodo que genera el material de aporte que se coloca entre las piezas que se pretende soldar, una vez que el cordón de soldadura se enfría da como resultado una unión fija y resistente [20].



Figura 11. Soldadora SMAW.

Fresadora CNC de 3 ejes

Es un equipo de mecanizado por control numérico computarizado, es una máquina herramienta muy versátil debido a que puede realizar operaciones de chaveteado, rasurado, planeado, entre otras, además de ser capaz de fabricar piezas complejas que requieren alto nivel de precisión [20].



Figura 12. Fresadora CNC de 3 ejes.

2.2.Métodos

2.2.1. Descripción de la metodología

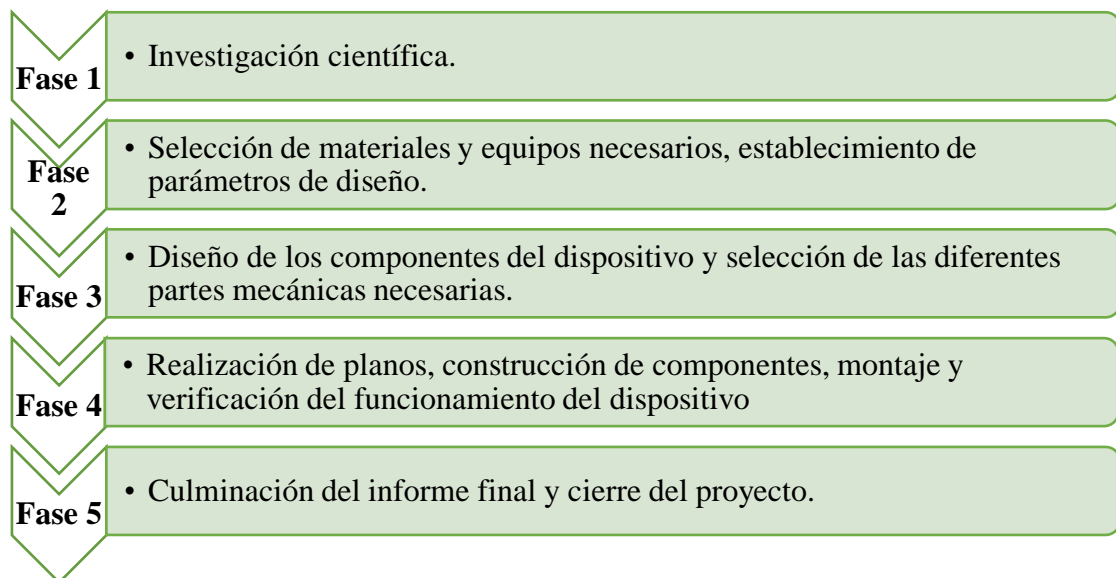


Figura 13. Fases de la metodología del proyecto.

Fase 1: En la primera fase se efectuará la exploración y análisis bibliográfico con el objetivo de adquirir información que garantice el adecuado desarrollo del marco teórico, para ello se deberá compilar información proveniente de libros, artículos científicos, papers, acerca del tema propuesto.

Fase 2: En la segunda fase se efectuará la selección de los materiales que mejor se adapten al diseño y a la construcción del dispositivo, de igual manera se establecerán los parámetros de diseño que se adapten a los requerimientos de los estudiantes.

Fase 3: En la tercera fase se desarrollará el diseño de cada uno de los componentes estructurales que constituyen el dispositivo, aplicando de manera adecuada criterios de ingeniería que cumplan con los requerimientos suficientes para su correcto funcionamiento. De igual manera se desarrollará el diseño del dispositivo en software CAD

Fase 4: En la cuarta fase, a partir del diseño CAD, se procederá a elaborar planos de cada componente para iniciar la construcción de cada uno. Una vez terminada la construcción se procederá al montaje del dispositivo y finalmente se verificará el funcionamiento del mismo.

Fase 5: En la quinta y última fase, se procede a la culminación del informe final del presente proyecto técnico el cual debe abarcar: marco teórico, metodología, análisis y discusión de resultados, cálculos, verificación del funcionamiento, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

2.2.2. Selección de Alternativas

Al momento de seleccionar las alternativas es de suma importancia analizar los giroscopios de laboratorio que existen actualmente con la finalidad de tener un modelo inicial o base que sirva como guía para el diseño.

Por lo cual, se han escogido tres dispositivos distintos a modo de alternativas para ejecutar el diseño, y corresponden a: Giroscopio de súper precisión, Giroscopio Cardánico y Giroscopio de tres ejes. A continuación, se efectuará la selección de la opción más viable según el método ordinal corregido de criterios ponderados.

Alternativa 1: Giroscopio de súper precisión.



Figura 14. Giroscopio de súper precisión [14].

Alternativa 2: Giroscopio Cardánico.



Figura 15. Giroscopio Cardánico [21].

Alternativa 3: Giroscopio de tres ejes.



Figura 16. Giroscopio de tres ejes [21].

Método ordinal corregido de criterios ponderados

Este método es altamente recomendado al momento de ejecutar un diseño debido a que posibilita alcanzar resultados globales altamente significativos al evaluar las alternativas planteadas, con la finalidad de seleccionar la opción más viable después de realizada la valoración. Generalmente en esta evaluación se ponderan diferentes aspectos en base a determinados criterios [22].

Lo más propicio para la aplicación de dicho método es contar con al menos 3 alternativas y 6 como máximo, cada una con características diferentes. Los criterios deben ser fijados minuciosamente ya que en base a estos se evaluará las alternativas [22].

En la tabla 6 se indican los valores que deben ser asignados a cada criterio.

Tabla 6. Descripción de los valores a ponderar [22].

Valor	Descripción
1	Si el criterio de las filas es superior que el de las columnas.
0.5	Si el criterio de las filas es igual al de las columnas.
0	Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas.

Los criterios que serán valorados para el presente proyecto son los mencionados a continuación:

- **Viabilidad de construcción:** La viabilidad de construcción está directamente ligada con la disponibilidad de materiales, así como de maquinaria y procesos para la construcción de los componentes, partes o piezas que componen el dispositivo.
- **Costo:** El costo es un criterio crucial para el desarrollo del dispositivo ya que es necesario ajustarse al presupuesto planteado para la construcción del dispositivo.
- **Ensamblaje y Desensamblaje:** Este criterio analiza la sencillez al momento del montaje y desmontaje del dispositivo, debido a que éste no deberá ser muy complejo para la correcta operación por parte de estudiantes y docentes.

- **Mantenimiento:** Las actividades de mantenimiento deben efectuarse de manera ágil y sencilla sin ninguna clase de complejidad, adicionalmente este criterio analiza la disponibilidad en el mercado nacional de las partes reemplazables.
- **Tamaño y peso:** El dispositivo deberá poseer una dimensión apropiada para el área en la cual va a ser acomodado y utilizado, de igual manera su peso deberá posibilitar su fácil desplazamiento.

2.2.2.1. Valoración de los criterios para el diseño y construcción de un Giroscopio.

Tabla 7. Valoración del peso específico de los criterios planteados.

Criterios	Viabilidad de construcción	Costo	Ensamblaje y Desensamblaje	Mantenimiento	Tamaño y peso	$\Sigma+1$	Ponderación
Viabilidad de construcción		0.5	1	1	1	4.5	0.3
Costo	0.5		0	0.5	0.5	2.5	0.167
Ensamblaje y Desensamblaje	0	1		1	0.5	3.5	0.233
Mantenimiento	0	0.5	0		1	2.5	0.167
Tamaño y peso	0	0.5	0.5	0		2	0.133
					SUMA	15	1

Como se puede observar en la tabla 7 los criterios que adquieren una mayor ponderación son la viabilidad de construcción con un valor de 0.3 seguido del ensamblaje y desensamblaje con un valor de 0.233, mientras que el valor de ponderación más bajo es de 0.133 que corresponde al tamaño y peso.

Tabla 8. Valoración del criterio viabilidad de construcción.

Viabilidad de construcción	Giroscopio de súper precisión	Giroscopio Cardánico	Giroscopio de tres ejes	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	1	2	0.333
Alternativa 2	1		1	3	0.5
Alternativa 3	0	0		1	0.167
			SUMA	6	1

En la tabla 8 se muestra la valoración del criterio viabilidad de construcción respecto a cada alternativa planteada, dando como resultado más alto un valor de 0.5 correspondiente a la Alternativa 2.

Tabla 9. Valoración del criterio costo.

Costo	Giroscopio de súper precisión	Giroscopio Cardánico	Giroscopio de tres ejes	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0.5	2	0.333
Alternativa 2	0.5		1	2.5	0.417
Alternativa 3	0.5	0		1.5	0.25
			SUMA	6	1

En la tabla 9 se muestra la valoración del criterio costo respecto a cada alternativa planteada, dando como resultado más alto un valor de 0.417 correspondiente a la Alternativa 2.

Tabla 10. Valoración del criterio ensamblaje y desensamblaje.

Ensamblaje y Desensamblaje	Giroscopio de súper precisión	Giroscopio Cardánico	Giroscopio de tres ejes	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0	1.5	0.25
Alternativa 2	0.5		0	1.5	0.25
Alternativa 3	1	1		3	0.5
			SUMA	6	1

En la tabla 10 se muestra la valoración del criterio ensamblaje y desensamblaje respecto a cada alternativa planteada, dando como resultado más alto un valor de 0.5 correspondiente a la Alternativa 3.

Tabla 11. Valoración del criterio mantenimiento.

Mantenimiento	Giroscopio de súper precisión	Giroscopio Cardánico	Giroscopio de tres ejes	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0.5	1.5	0.25
Alternativa 2	1		0.5	2.5	0.417
Alternativa 3	0.5	0.5		2	0.333
			SUMA	6	1

En la tabla 11 se muestra la valoración del criterio mantenimiento respecto a cada alternativa planteada, dando como resultado más alto un valor de 0.417 correspondiente a la Alternativa 2.

Tabla 12. Valoración del criterio tamaño y peso.

Tamaño y peso	Giroscopio de super precisión	Giroscopio Cardánico	Giroscopio de tres ejes	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	1	0.166
Alternativa 2	1		0.5	2.5	0.417
Alternativa 3	1	0.5		2.5	0.417
			SUMA	6	1

En la tabla 12 se muestra la valoración del criterio mantenimiento respecto a cada alternativa planteada, dando como resultado más alto un valor de 0.417 correspondiente a la Alternativa 2 y Alternativa 3.

Tabla 13. Conclusiones de la valoración de criterios.

Conclusión	Viabilidad de construcción	Costo	Ensamblaje y Desensamblaje	Mantenimiento	Tamaño y peso	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0.0999	0.0556	0.0582	0.0417	0.0221	0.2775	3
Alternativa 2	0.15	0.0696	0.0582	0.0696	0.0554	0.4028	1
Alternativa 3	0.0501	0.0417	0.1165	0.0556	0.0554	0.3193	2

En la tabla 13 se muestran las conclusiones de la valoración y ponderación de cada criterio, dando como resultado más alto en la sumatoria un valor de 0.4028 correspondiente a la Alternativa 2: Giroscopio Cardánico, por lo tanto, se selecciona la misma para el diseño.

2.2.3. Esquema general del Giroscopio Cardánico y sus componentes

En la figura 17 y 18 se puede observar un esquema general del dispositivo que va a ser diseñado y posteriormente construido.

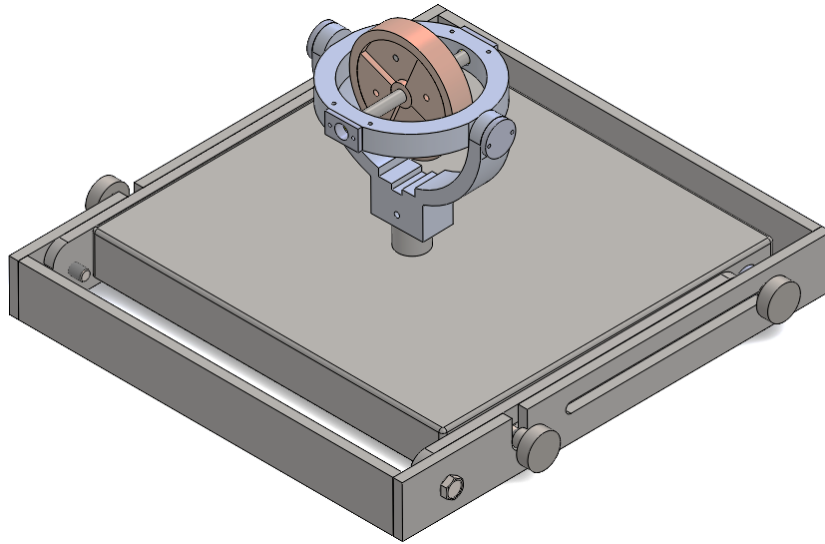


Figura 17. Vista Isométrica del Giroscopio Cardánico.

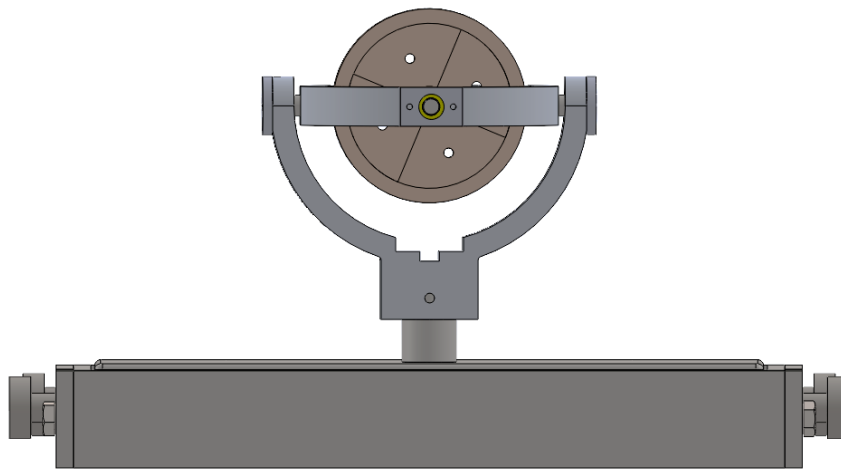
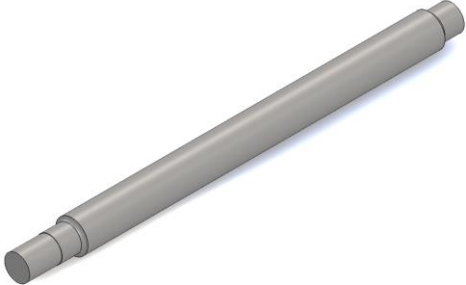
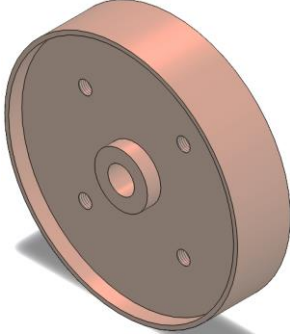

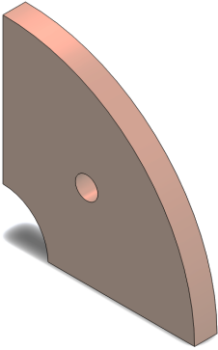
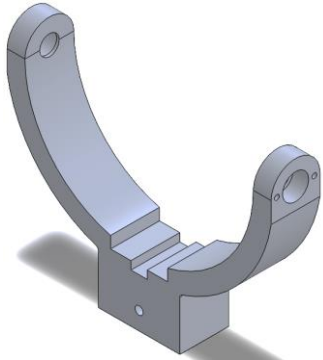
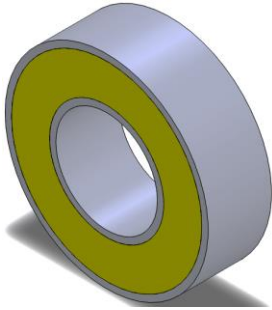
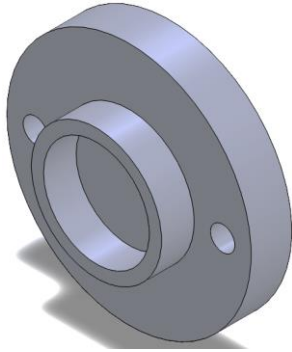
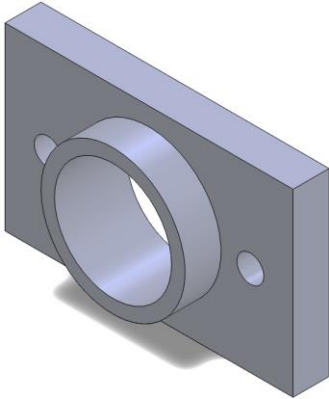


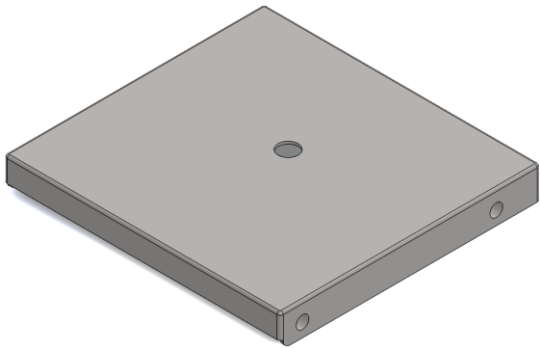
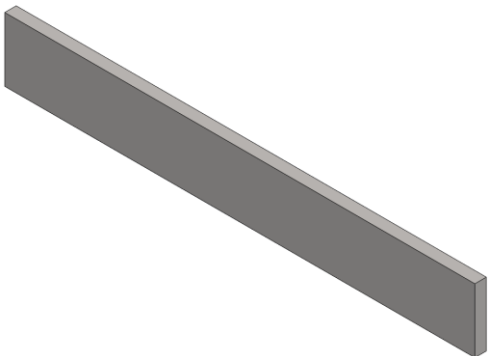
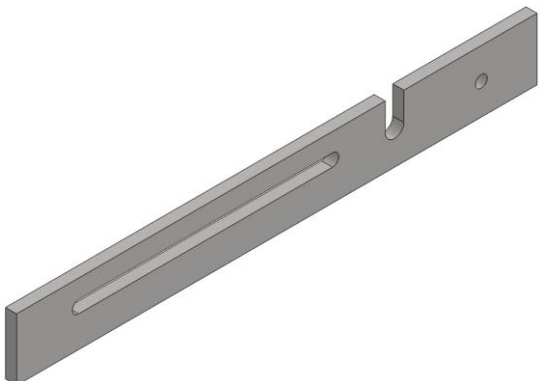
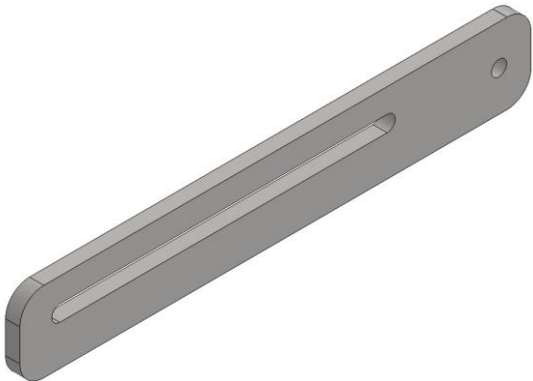
Figura 18. Vista frontal del Giroscopio Cardánico.

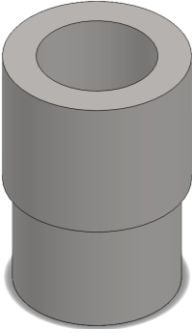
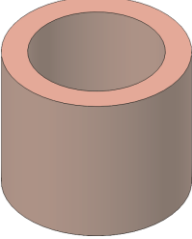
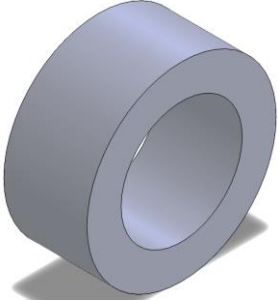
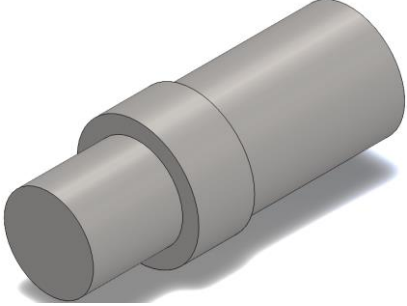
A continuación, en la tabla 14 se especifica cada una de las piezas que componen el dispositivo.

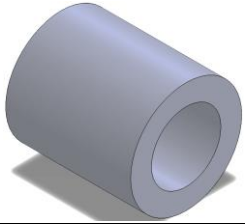
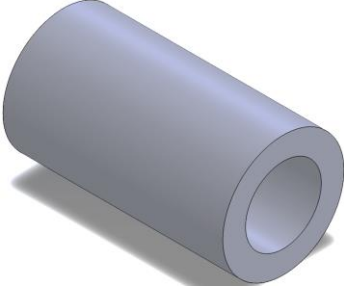
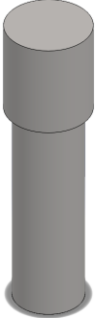
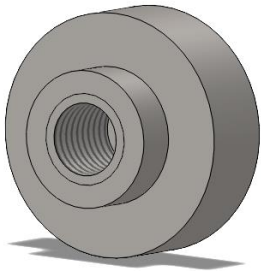
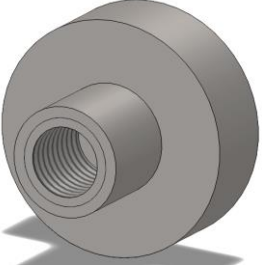
Tabla 14. Componentes del dispositivo.

Componentes del Giroscopio Cardánico		
Denominación	Cantidad	Ilustración
Eje	1	
Rotor	1	
Anillo Cardán	1	
Masa del rotor	8	

Componentes del Giroscopio Cardánico		
Denominación	Cantidad	Ilustración
Semianillo Cardán	1	
Rodamientos cerámicos	4	
Tapa del semianillo	2	
Tapa del anillo	2	

Componentes del Giroscopio Cardánico		
Denominación	Cantidad	Ilustración
Base	1	
Platina lateral	2	
Platina lateral ranurada	2	
Platina de posicionamiento angular	2	

Componentes del Giroscopio Cardánico		
Denominación	Cantidad	Ilustración
Bocín de la base	1	
Bocín de bronce de la base	2	
Separador	2	
Eje del anillo	2	

Componentes del Giroscopio Cardánico		
Denominación	Cantidad	Ilustración
Bocín móvil posterior	2	
Bocín móvil delantero	2	
Eje de rotación del semianillo	1	
Rosca delantera	2	
Rosca posterior	2	

2.2.4. Parámetros de diseño

2.2.4.1. Dimensionamiento preliminar

El dispositivo estará ubicado en el Laboratorio de Física de la Carrera de Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, por lo que se establecerán las dimensiones preliminares del Giroscopio Cardánico analizando las medidas sugeridas en términos de ergonomía para definir la altura de plano de trabajo que dependerá de la naturaleza de la actividad a realizar en este caso prácticas de experimentación en laboratorio.

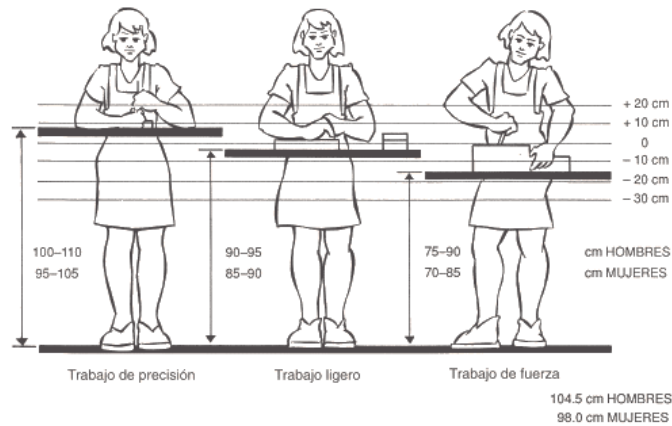


Figura 19. Diferentes alturas de plano de trabajo dependiendo de la naturaleza del trabajo [23].

El experimento se realizará de pie porque es necesario poder observar el funcionamiento desde distintos puntos y además se requiere utilizar equipo adicional para medir velocidades y cronometrar tiempos.

Tabla 15. Altura del Plano de trabajo en función de la tarea [23].

ALTURA DEL PLANO DE TRABAJO EN FUNCIÓN DE LA TAREA				
TIPO DE TAREA	DE PIE (cm)		SENTADO (cm)	
	Hombre	Mujer	Hombre	Mujer
De precisión	109 - 119	103 - 113	90 - 110	80 - 100
Trabajo ligero	99 - 109	87 - 98	68	65
Trabajo de fuerza	85 - 101	78 - 94	74 - 78	70 - 74

Por lo tanto, en función de la actividad o tarea que se va a realizar, que es de tipo ligero y se realiza de pie, la altura del plano de trabajo se encuentra en un rango de 99 – 109 cm para hombres mientras que la altura del plano de trabajo para mujeres se encuentra en un rango de 87 – 90 cm. Para establecer la altura del plano de trabajo del dispositivo se tomará una altura promedio en un rango de 98 – 109 cm y basándose en las instalaciones de los laboratorios la altura del plano de trabajo será de 100 cm dentro del rango permitido.

2.2.5. Diseño y selección de componentes

En la tabla que se muestra a continuación se establecen los parámetros iniciales de diseño.

Tabla 16. Parámetros iniciales de diseño.

DATOS DE ENTRADA			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDAD
Longitud del eje	L_e	135	mm
Diámetro del eje	D_e	10	mm
Diámetro del rotor	D_r	88	mm
Diámetro externo del anillo	D_{ea}	135	mm
Diámetro interno del anillo	D_{ia}	105	mm
Radio del Semianillo	R_s	70	mm
Masa del eje	m_e	79.29	g
Masa del rotor	m_r	1040.46	g
Masa del anillo	m_a	283.99	g
Masa del Semianillo	m_s	239.92	g
Material del eje	Acero inoxidable AISI 304		
Material del rotor	Bronce fosfórico		
Material del anillo	Aluminio 6061		
Material del Semianillo	Aluminio 6061		
Resistencia a la fluencia AISI 304	Sy_1	276	MPa
Resistencia a la tensión AISI 304	Sut_1	568	MPa
Resistencia a la fluencia Bronce Fosfórico	Sy_2	415	MPa

DATOS DE ENTRADA			
PARÁMETRO	SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDAD
Resistencia a la tensión Bronce Fosfórico	Sut_2	470	MPa
Resistencia a la fluencia Aluminio 6061	Sy_3	55.2	MPa
Resistencia a la tensión Aluminio 6061	Sut_3	124	MPa
Velocidad angular del rotor	w	1130	rad/s
Gravedad	g	9.81	m/s^2
Altura del plano de trabajo		100	cm

2.2.5.1. Diseño del eje

El eje del giroscopio estará sujeto a esfuerzos de flexión, originados por el peso propio de los elementos, y a esfuerzos de torsión, dependiendo del torque necesario para producir la rotación del mismo.

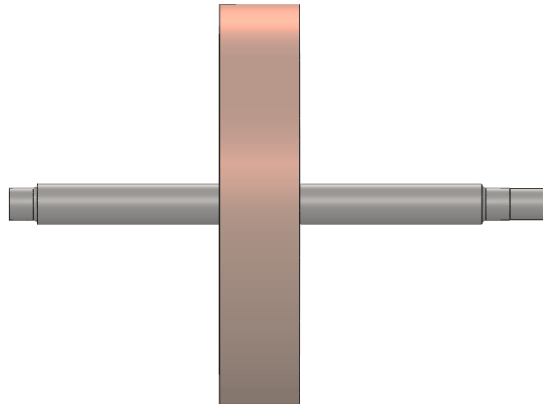


Figura 20. Eje y Rotor.

Determinación de pesos

$$W1 = m_e * g = 0.07929 \text{ kg} \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = 0.7778 \text{ N}$$

$$W2 = m_r * g = 1.04046 \text{ kg} \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) = 10.21 \text{ N}$$

Determinación de Reacciones

$$F1 = W1 = 0.7778 \text{ N}$$

$$X1 = \frac{L}{2} = \frac{0.135}{2} = 0.0675 \text{ m}$$

$$F2 = W2 = 13.3 \text{ N}$$

$$X2 = 0.0525 + \frac{0.02}{2} = 0.0625$$

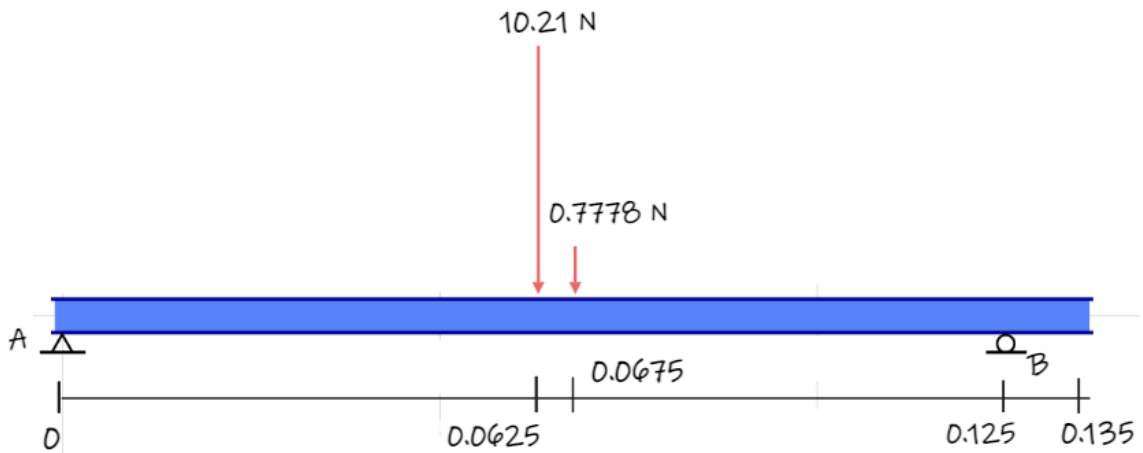


Figura 21. Diagrama de cuerpo libre para la determinación de reacciones.

$$\Sigma M_A = 0 \quad \curvearrowright +$$

$$R_B(0.125) - F1 * X1 - F2 * X2 = 0$$

$$R_B(0.125 \text{ m}) = 0.7778 \text{ N} (0.0675 \text{ m}) + 10.21 \text{ N} (0.0625 \text{ m})$$

$$R_B = \frac{0.6906265 \text{ Nm}}{0.125 \text{ m}}$$

$$R_B = 5.525 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad \downarrow -$$

$$R_A + R_B - F1 - F2 = 0$$

$$R_A = F1 + F2 - R_b$$

$$R_A = 0.7778 \text{ N} + 10.21 \text{ N} - 5.525 \text{ N}$$

$$R_A = 5.462 \text{ N}$$

Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector

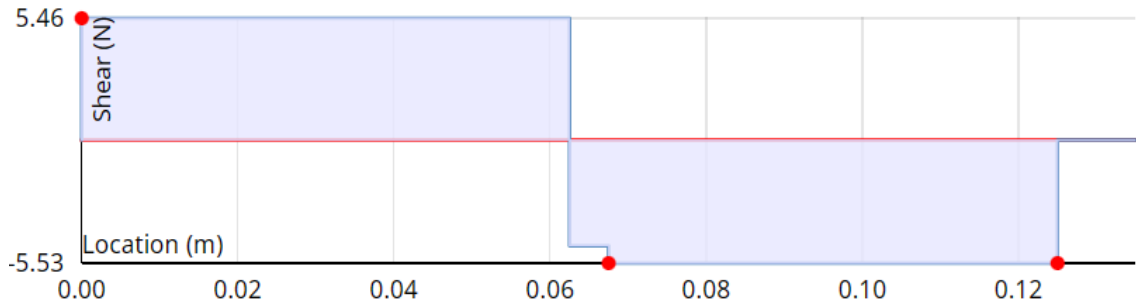


Figura 22. Diagrama de Fuerza Cortante.

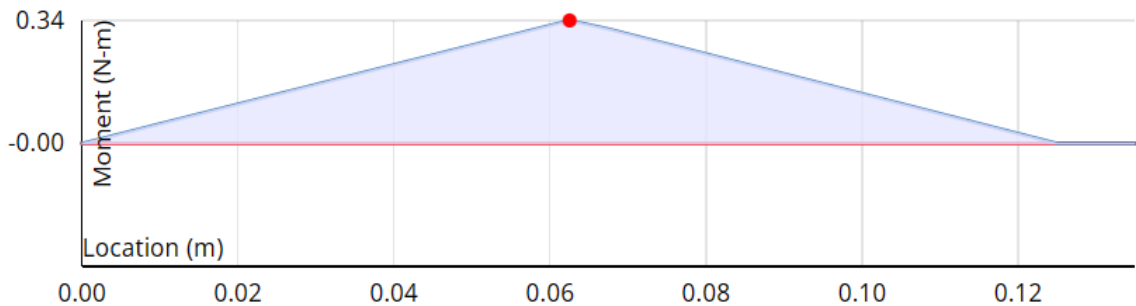


Figura 23. Diagrama de Momento Flector.

Determinación del Torque requerido

$$T = I\alpha \quad (27)$$

$$T = \frac{1}{2}mr^2 * \frac{w}{t} = \frac{1}{2}(1.04046 \text{ kg})(0.044\text{m})^2 * \frac{1130 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{5\text{s}}$$

$$T = 0.22762 \text{ Nm} = 227.62 \text{ Nmm}$$

Cálculo del Diámetro del eje a cargas estáticas

Factor de seguridad = $n = 3$

Sometido a un momento flector M

$$\sigma_x = \frac{M_{max} * C}{I} = \frac{32 M_{max}}{\pi d^3} \quad (28)$$

Sometido a un par torsor T

$$\tau_{xy} = \frac{T * C}{I} = \frac{16 T}{\pi d^3} \quad (29)$$

Teoría del esfuerzo cortante máximo para materiales dúctiles (EMC)

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (30)$$

Mediante sustitución de los valores obtenidos anteriormente se tiene:

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (31)$$

Tomando en cuenta que $\tau_{max} = S_y/2n$ se despeja el diámetro obteniendo:

$$d = \left(\frac{32 n}{\pi S_y} (M^2 + T^2)^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (32)$$

$$d = \left(\frac{32 (3)}{\pi (276 \text{ MPa})} ((341 \text{ Nmm})^2 + (227.62 \text{ Nmm})^2)^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 3.56 \text{ mm}$$

Factor de seguridad estático

$$n = \frac{S_y \pi d^3}{32T} \quad (33)$$

$$n = \frac{276(10^6 \text{ Pa})\pi(0.00356 \text{ m})^3}{32(0.22762 \text{ Nm})}$$

$$n = 5.37$$

Cálculo del diámetro del eje para resistencia a cargas alternantes (Fatiga)

$$\sigma_a = K_f \frac{M_a c}{I} = K_f \frac{32 M_a}{\pi d^3} \quad (34)$$

$$\sigma_m = K_f \frac{M_m c}{I} = K_f \frac{32 M_m}{\pi d^3} \quad (36)$$

$$\tau_a = K_{fs} \frac{T_a c}{I} = K_{fs} \frac{16 T_a}{\pi d^3} \quad (35)$$

$$\tau_m = K_{fs} \frac{T_m c}{I} = K_{fs} \frac{16 T_m}{\pi d^3} \quad (37)$$

En el caso de un eje giratorio, el momento flexionante constante creará un esfuerzo flexionante completamente reversible $M_m = T_a = 0$.

K_f y K_{fs} son los factores de concentración de esfuerzos por fatiga de la flexión y la torsión.

$$\frac{D}{d} = \frac{10 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} = 1.25$$

$$\frac{r}{d} = \frac{1 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} = 0.125$$

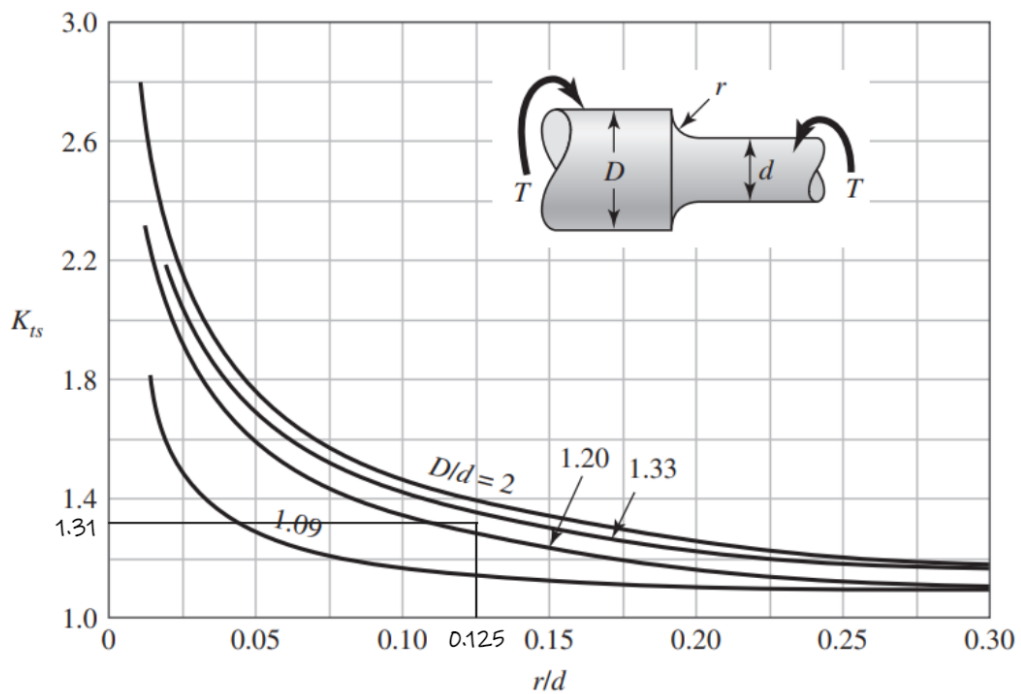


Figura 24. Eje redondo con filete en el hombro en torsión [24].

$$K_{ts} = 1.31$$

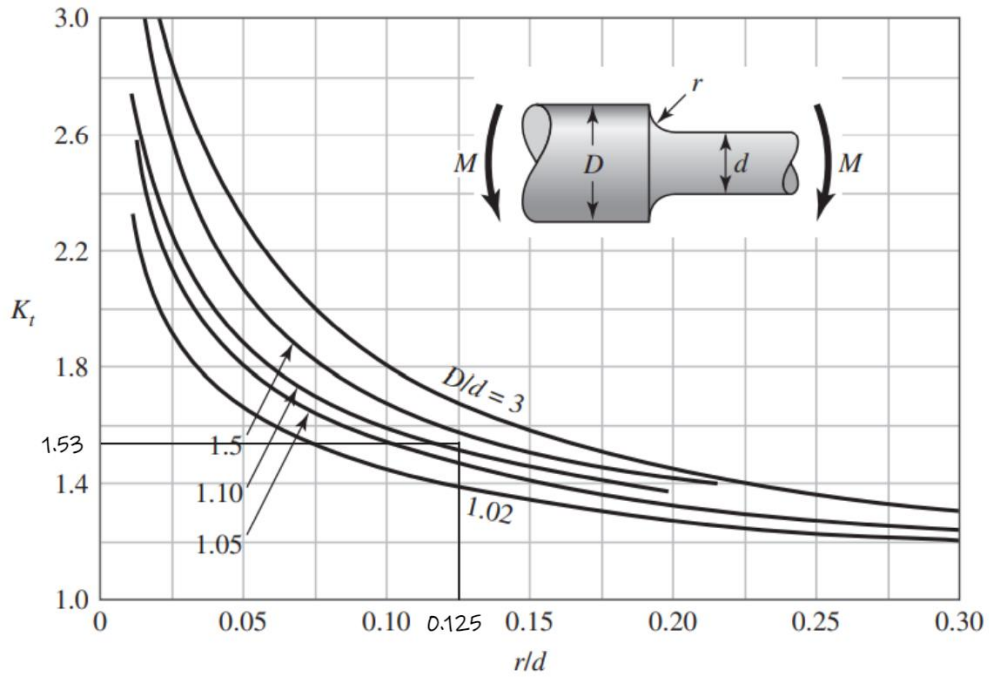


Figura 25. Eje redondo con filete en el hombro en flexión [24].

$$K_t = 1.53$$

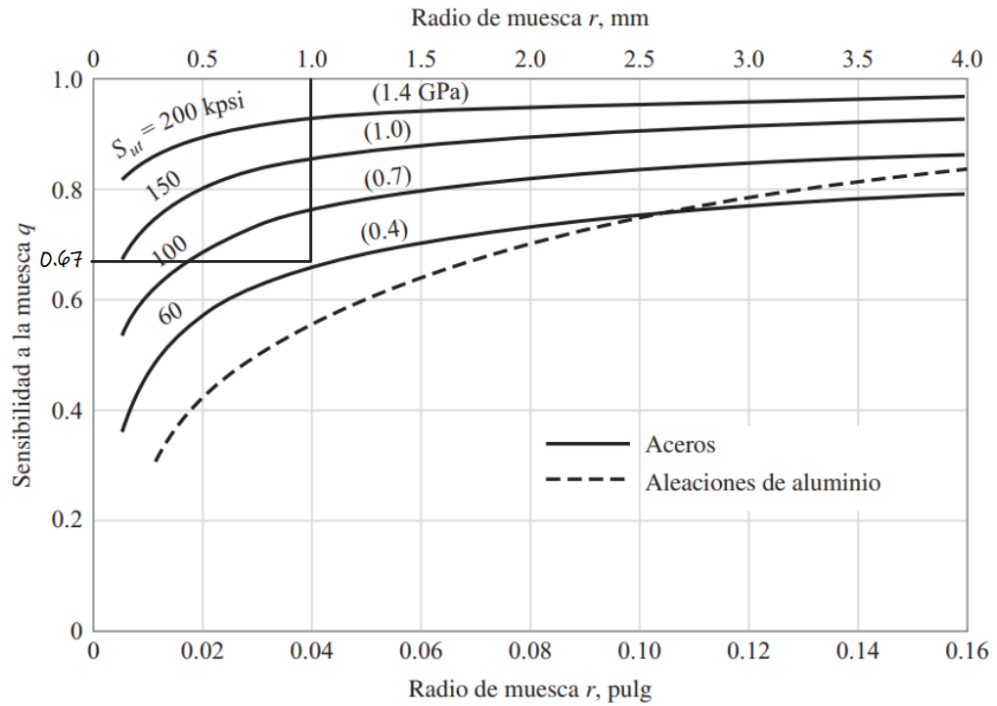


Figura 26. Sensibilidad a la muesca "q" en flexión inversa [24].

$$q = 0.67$$

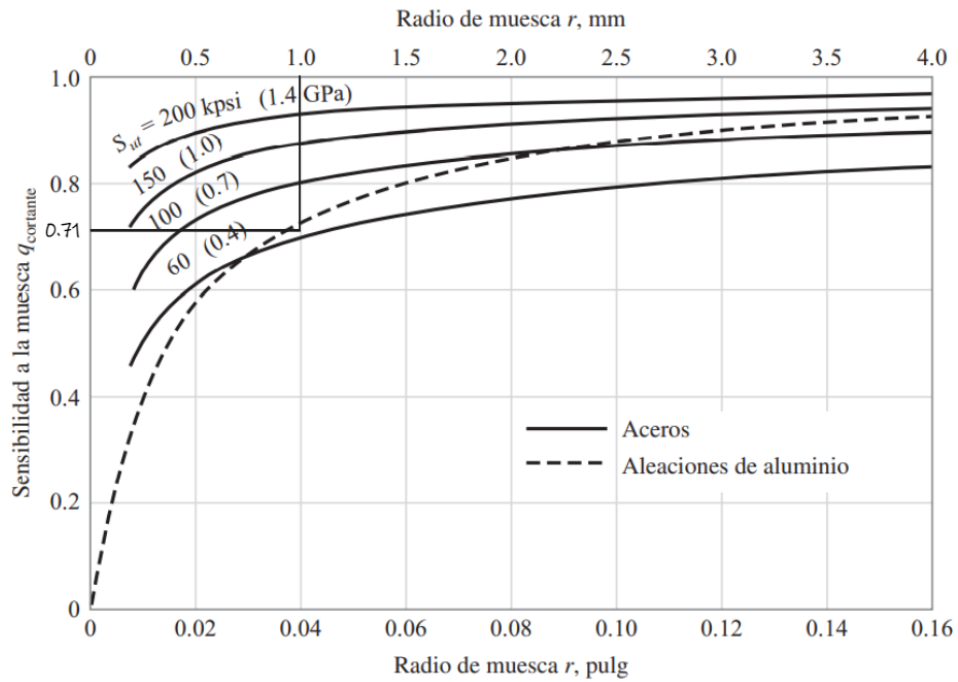


Figura 27. Sensibilidad a la muesca "q cortante" en torsión inversa [24].

$$q_{cortante} = 0.71$$

Determinación de los factores de concentración de esfuerzos

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0.67(1.53 - 1)$$

$$K_f = 1.3551$$

$$K_{fS} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1) = 1 + 0.71(1.35 - 1)$$

$$K_{fS} = 1.2201$$

Determinación del límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica

Límite de resistencia a la Fatiga en viga rotatoria

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \tag{38}$$

$$S'_e = 0.5 (568 \text{ MPa})$$

$$S'_e = 284 \text{ MPa}$$

Ecuación de Marin

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (39)$$

Factor de superficie k_a

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (40)$$

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Figura 28. Parámetros en el factor de condición superficial de Marin [24].

$$k_a = (4.51)(440)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.898$$

Factor de tamaño k_b

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad (2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm}) \quad (41)$$

$$k_b = 1.24(8)^{-0.107} = 0.99$$

Factor de modificación por la carga k_c

$$k_c = 1 \text{ (torsión y flexión)}$$

Factor de temperatura k_d

$$k_d = 1 \text{ (sin variación de temperatura)}$$

Factor de confiabilidad k_e

$$k_e = 1 - 0.08Z_a \quad (42)$$

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Figura 29. Factores de confiabilidad k_e de 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga [24].

$$k_e = 1 - 0.08(1.288)$$

$$k_e = 0.897$$

Factor de efectos varios k_f

Considerando la gran cantidad de efectos varios se establece $k_f = 0.98$

Reemplazando todos los valores obtenidos anteriormente se determina:

$$S_e = (0.898)(0.99)(1)(1)(0.897)(0.98)(284MPa)$$

$$S_e = 221.9 MPa \approx 222 MPa$$

ED – Goodman

Factor de seguridad = $n = 3$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (43)$$

Se despeja el diámetro obteniendo:

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (44)$$

$$d = \left(\frac{16(3)}{\pi} \left\{ \frac{1}{222MPa} [4(1.3551 * 341Nmm)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{568MPa} [3(1.22 * 227.62Nmm)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(\frac{16(3)}{\pi} \left\{ \frac{1}{222MPa} (924.178 Nmm) + \frac{1}{568MPa} (481.02Nmm) \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(\frac{16(3)}{\pi} \{5.00\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 4.24 \text{ mm}$$

Después de haber realizado el análisis a cargas estáticas y alternantes, se establece que por razones de diseño el diámetro del eje de Acero Inoxidable AISI 304 será de 10 mm.

Determinación del factor de seguridad contra la fatiga (n_y)

Esfuerzo máximo de Von Mises

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{32K_f(M_m + M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs}(T_m + T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{32(1.3551)(0 + 341Nmm)}{\pi(4.24mm)^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16(1.22)(227.62Nmm + 0)}{\pi(4,24mm)^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = 69.61MPa$$

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{m\acute{a}x}} \quad (46)$$

$$n_y = \frac{276 MPa}{69.61MPa}$$

$$n_y = 3.96$$

2.2.5.2. Selección de rodamientos

Se procede a determinar la vida útil del rodamiento en horas de funcionamiento.

Tabla 17. Vida útil de los diferentes tipos de máquinas [25].

Valores orientativos de la vida útil especificada de los diferentes tipos de máquinas	
Tipo de máquina	Vida útil especificada Horas de funcionamiento
Electrodomésticos, máquinas agrícolas, instrumentos, equipos técnicos de uso médico	300 ... 3 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos: herramientas eléctricas portátiles, dispositivos de elevación en talleres, máquinas y equipos para la construcción	3 000 ... 8 000
Máquinas utilizadas intermitentemente o durante breves períodos donde se requiere una alta confiabilidad: ascensores (elevadores), grúas para productos embalados o eslingas para tambores, etc.	8 000 ... 12 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario, no siempre utilizadas al máximo: transmisiones por engranajes de uso general, motores eléctricos para uso industrial, trituradoras giratorias	10 000 ... 25 000
Máquinas para 8 horas de trabajo diario utilizando plenamente sus capacidades: herramientas mecánicas, máquinas para carpintería, máquinas para la industria de la ingeniería, grúas para materiales a granel, ventiladores, cintas transportadoras, equipos de impresión, separadores y centrifugadoras	20 000 ... 30 000
Máquinas para 24 horas de trabajo continuo: unidades de engranajes para laminadores, maquinaria eléctrica de tamaño medio, compresores, tornos de extracción para minas, bombas, maquinaria textil	40 000 ... 50 000
Maquinaria para energía eólica, incluidos los rodamientos del eje principal, de orientación, de la caja de engranajes de cambio de paso, del generador	30 000 ... 100 000
Maquinaria para abastecimiento de agua, hornos giratorios, máquinas de trenzado de cables, maquinaria de propulsión para buques de alta mar	60 000 ... 100 000
Maquinas eléctricas de gran tamaño, plantas de generación de energía, bombas para minas, ventiladores para minas, rodamientos para ejes en túnel para buques de alta mar	> 100 000

Se establece una vida útil $L_{10h} = 100000$ horas de funcionamiento.

Considerando que la velocidad de giro es de $n = 10000$ rpm y la carga dinámica equivalente $P = 0.005525$ kN se procede a determinar la capacidad de carga dinámica:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} \quad (47)$$

$$100000 = \frac{10^6}{60(10000)} L_{10}$$

$$L_{10} = 60000 \text{ (millones de revoluciones)}$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (48)$$

Donde $p = 3$ para rodamientos rígidos de bolas.

$$60000 = \frac{C^3}{(0.005525)^3}$$

$$C^3 = 60000(0.005525)^3$$

$$C = 0.216 \text{ kN}$$

Para un diámetro de 8 mm perteneciente a las ranuras donde van insertados los rodamientos, se selecciona uno con las características indicadas a continuación en la figura 30.

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite ¹⁾		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado ¹⁾
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
8	16	4	0,819	0,3	0,012	90 000	56 000	0,003	618/8	-
	16	5	1,33	0,57	0,024	-	26 000	0,0036	▶ 628/8-2RS1	-
	16	5	1,33	0,57	0,024	90 000	45 000	0,0036	▶ 628/8-2Z	-
	16	6	1,33	0,57	0,024	90 000	45 000	0,0043	638/8-2Z	-
	19	6	1,46	0,465	0,02	-	24 000	0,0071	619/8-2RS1	-
	19	6	1,46	0,465	0,02	85 000	43 000	0,0071	619/8-2Z	-
	19	6	1,46	0,465	0,02	85 000	53 000	0,0071	619/8	-
	19	6	2,34	0,95	0,04	85 000	43 000	0,0072	607/8-2Z	607/8-Z
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	48 000	0,012	▶ 608	-
	22	7	3,45	1,37	0,057	-	22 000	0,012	▶ 608-2RSH	▶ 608-RSH
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	38 000	0,012	▶ 608-2RSL	608-RSL
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	38 000	0,013	▶ 608-2Z	608-Z
	22	11	3,45	1,37	0,057	-	22 000	0,016	▶ 630/8-2RS1	-
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	40 000	0,018	628	-
	24	8	3,9	1,66	0,071	-	19 000	0,017	628-2RS1	628-RS1
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	32 000	0,017	628-2RZ	628-RZ
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	32 000	0,018	▶ 628-2Z	628-Z
	28	9	1,33	0,57	0,024	60 000	30 000	0,03	638-2RZ	638-RZ

Figura 30. Dimensiones de rodamientos rígidos de bolas [25].

Cálculo de la vida nominal básica

Capacidad de carga básica dinámica = $C = 1.33 \text{ kN}$

Carga dinámica equivalente = $P = 0.005525 \text{ kN}$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3$$

$$L_{10} = \left(\frac{1.33}{0.005525}\right)^3$$

$$L_{10} = 13949481.84$$

Cálculo de la vida nominal básica en horas

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10}$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60(10000)} (13949481.84)$$

$$L_{10h} = 23249136.4 \text{ h}$$

2.2.5.3. Selección del motor

Potencia Requerida

$$P_{motor} = T_{motor} * W_{motor} \quad (49)$$

$$P_{motor} = 0.22762 \text{ Nm} * 157.08 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P_{motor} = 35.75 \text{ W}$$

40W (1/19 HP) Motors

40W Model		Rated Time (min)	Output (W)	Voltage (V)	Freq. (Hz)	Pole (P)	Current (A)	Variable Speed Range (rpm)	Starting Torque (kg.cm)	Max. Torque (kg.cm)	
										1200rpm	90rpm
Continuous	M540-001	Continuous	40	100/110	50/60	4	0.87/0.76	90~1400/90~1700	2.14/2.66	3.18/4.2	2.2/2.8
	M540-002			200/220	50/60		0.4/0.34	90~1400/90~1700	1.75/2.17	3.6/4.2	1.8/2.1
	M540-002E			230/240	50		0.32/0.32	90~1400	2.3/2.58	4.4/4.6	2.4/2.6
Reversible	M540-011	30	40	100/110	50/60	4	0.99/1.01	90~1400/90~1700	2.43/3.1	2.8/3.4	1.9/2.4
	M540-012			200/220	50/60		0.54/0.53	90~1400/90~1700	3.76/2.37	3/3.4	3/2.2
	M540-012E			230/240	50		0.49/0.44	90~1400	2.41/3.17	3/3.9	2/2.6

Figura 31. Características del motor [26].

Se determinó que la potencia requerida para poner en movimiento el giroscopio es de 35.75 W, tomando en cuenta que el valor calculado es el mínimo requerido, se seleccionará un motor de 250 W con velocidad variable accionado por pedal, iniciando de 0 a 12000 rpm. Siendo el más apropiado para el dispositivo ya que el torque debe ser aplicado lentamente debido al peso del eje y el rotor.

2.2.5.4. Análisis estático mediante software CAD para modelado mecánico

Mediante el uso de simulaciones se pueden realizar estudios de análisis estático para el eje y el rotor del giroscopio, con el objetivo de hallar los valores máximos y mínimos de tensiones, desplazamientos, deformaciones unitarias, factor de seguridad entre otros.

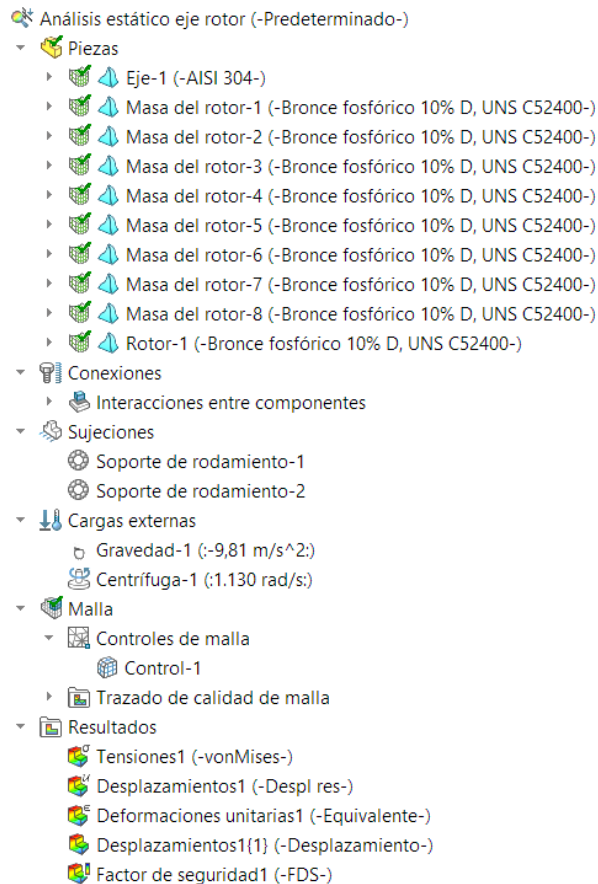


Figura 32. Parámetros de simulación.

En la Figura 32 se observan las condiciones iniciales necesarias para ejecutar la simulación. El eje del giroscopio estará montado sobre rodamientos de precisión que permiten su rotación y estará sometido a cargas externas de gravedad y una fuerza centrífuga aplicada en el eje. Se realiza un mallado de calidad a las piezas para que los resultados sean de mayor fiabilidad.

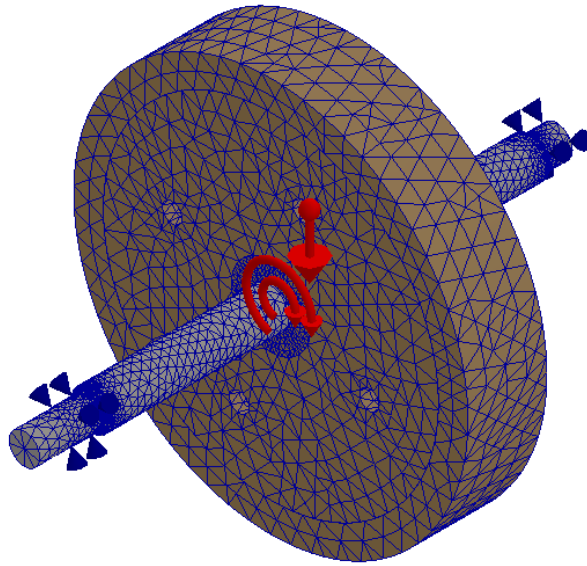


Figura 33. Eje y rotor sujetos a sus condiciones iniciales.

Tensiones

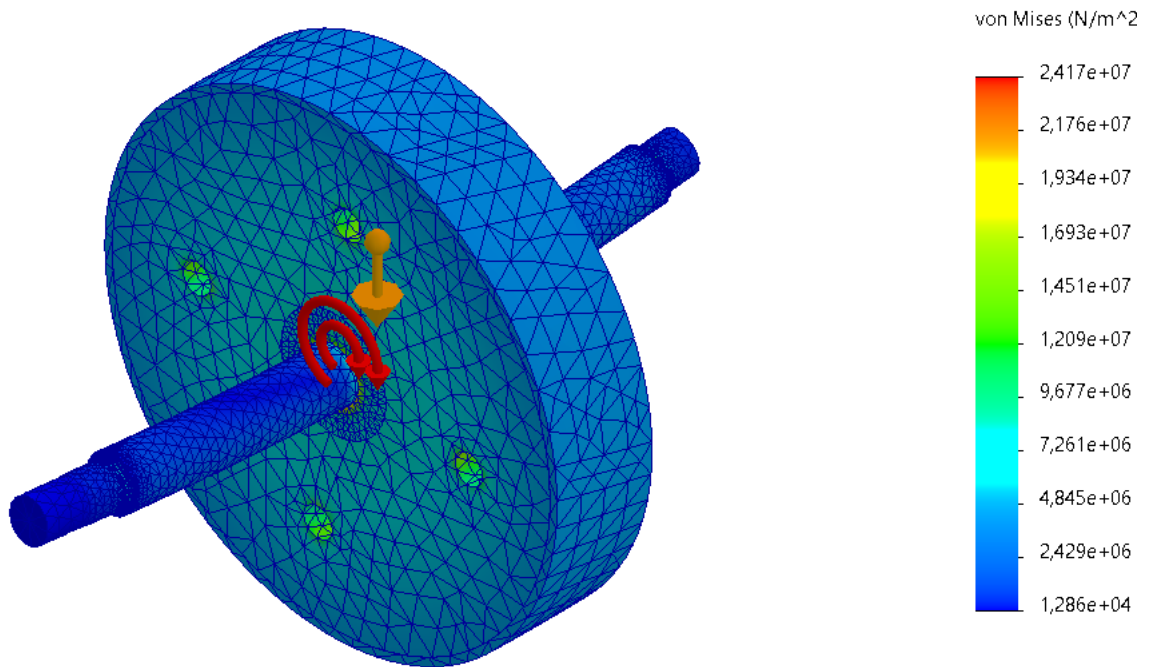


Figura 34. Resultados de tensiones.

En la Figura 34 se muestran las tensiones en el eje y el rotor, dando como resultado un valor máximo en rojo de $2.417 \times 10^7 Pa$ presente en el rotor y un valor mínimo en azul de $1.286 \times 10^4 Pa$ presente en ambos elementos.

Desplazamientos

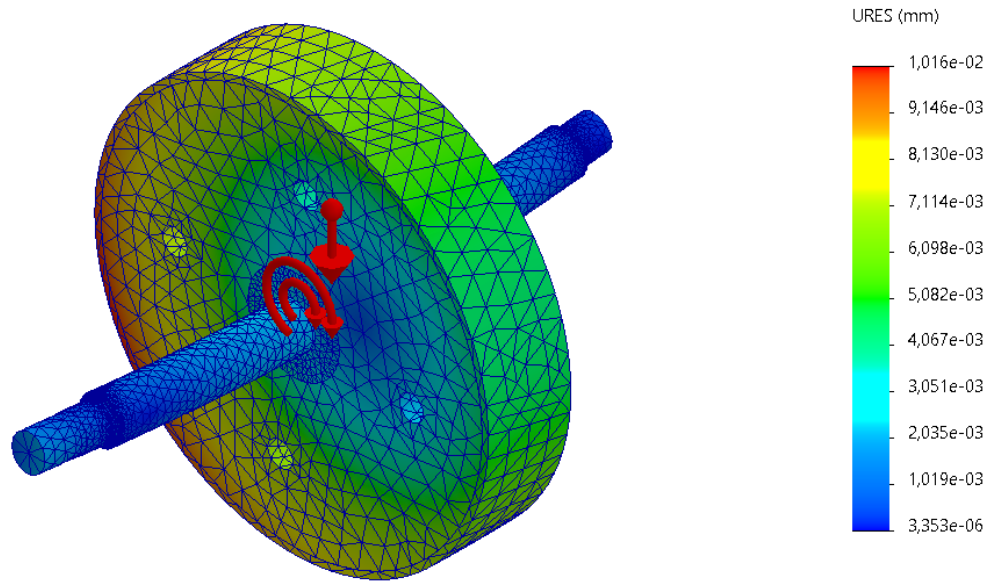


Figura 35. Resultados de desplazamientos.

En la Figura 35 se muestran los desplazamientos en el eje y el rotor, dando como resultado un valor máximo en rojo de $1.016 \times 10^{-2} \text{ mm}$ presente en el rotor y un valor mínimo en azul de $3.353 \times 10^{-6} \text{ mm}$ presente en ambos elementos.

Deformaciones Unitarias

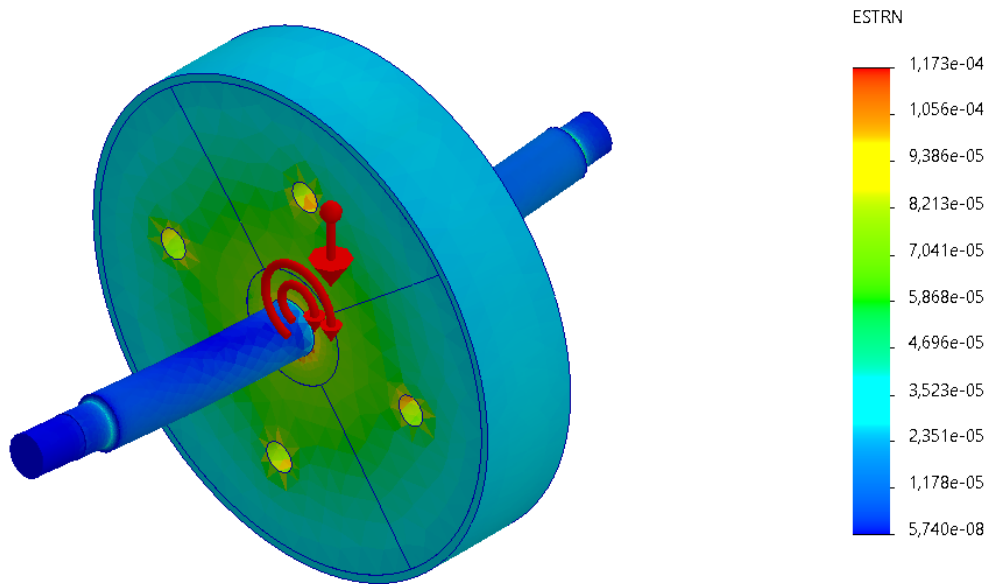


Figura 36. Resultados de deformaciones unitarias.

En la Figura 36 se muestran las deformaciones unitarias en el eje y el rotor, dando como resultado un valor máximo en rojo de $1.173 * 10^{-4}$ presente en el eje y un valor mínimo en azul de $5.740 * 10^{-8}$ presente en el eje. La deformación unitaria al ser una proporción del cambio en longitud con respecto a la longitud original es una cantidad sin dimensiones.

Factor de Seguridad

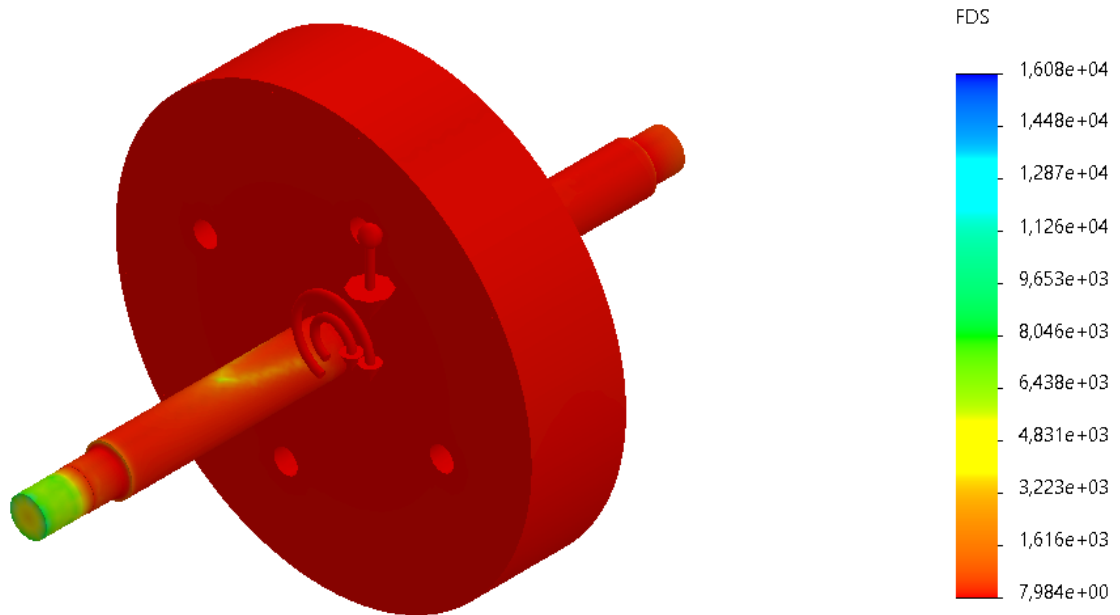


Figura 37. Resultados del factor de seguridad.

En la Figura 37 se muestra el factor de seguridad, dando como resultado un valor máximo en azul de $1.608 * 10^4$ y un valor mínimo en rojo de 7.984. La razón de que este factor de un valor más elevado al calculado analíticamente se debe a que por razones estéticas y de diseño el diámetro del eje es de 10 mm, superior al mínimo calculado, asegurando que este alcance una vida infinita sin sufrir fallos por fatiga del material.

2.2.5.5. Estudio de Fatiga

Es una simulación avanzada que nos permite estudiar la vida y los daños de diseño debidos a cargas cíclicas definidas por eventos de amplitud constante o variable.

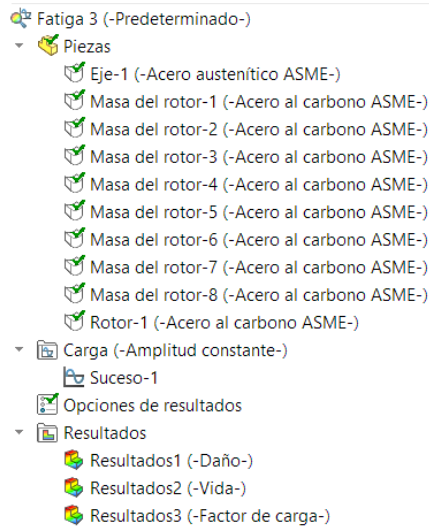


Figura 38. Parámetros iniciales del estudio de fatiga.

En la Figura 38 se observan las condiciones iniciales necesarias para ejecutar el estudio de fatiga. Se agrega un suceso de un millón de ciclos para comprobar que el mecanismo alcance vida infinita sin sufrir fallos por fatiga del material.

Daño

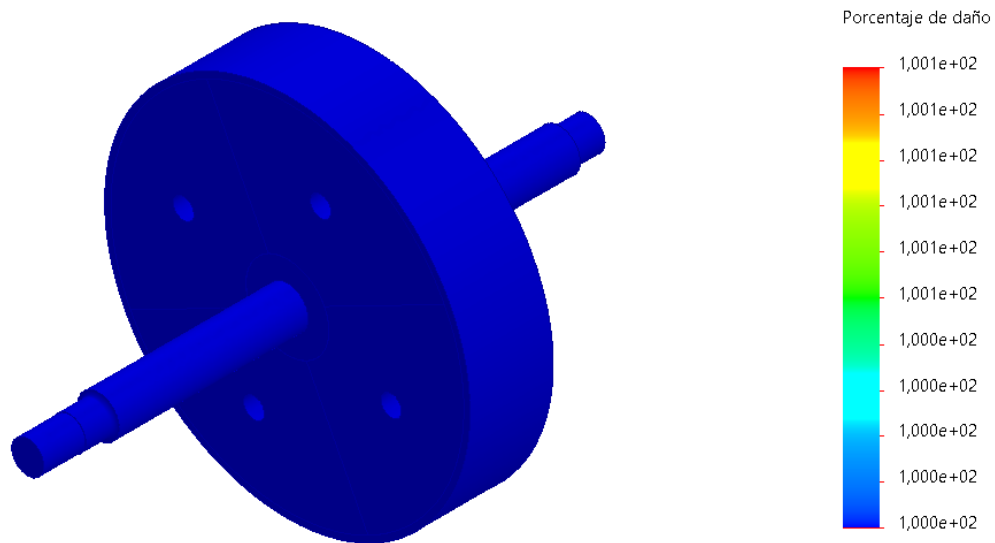


Figura 39. Porcentaje de Daño.

En la figura 39 se muestra el porcentaje de daño en el eje y el rotor, dando como resultado un valor mínimo en azul de $1 * 10^2$ % presente en todo el elemento y un valor máximo en rojo de $1.001 * 10^2$ que no es visible en ningún elemento.

Vida

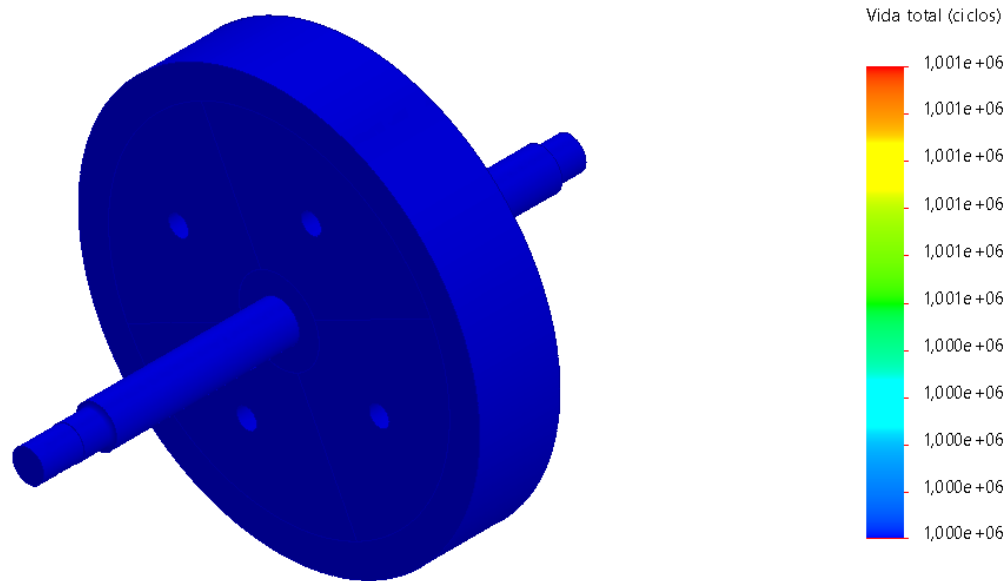


Figura 40. Vida total.

En la figura 40 se muestra la vida total en ciclos del eje y el rotor, dando como resultado un valor mínimo en azul de $1 * 10^6$ ciclos presente en ambos elementos y un valor máximo en rojo de $1.001 * 10^6$ ciclos que no es visible en ningún elemento.

Factor de carga

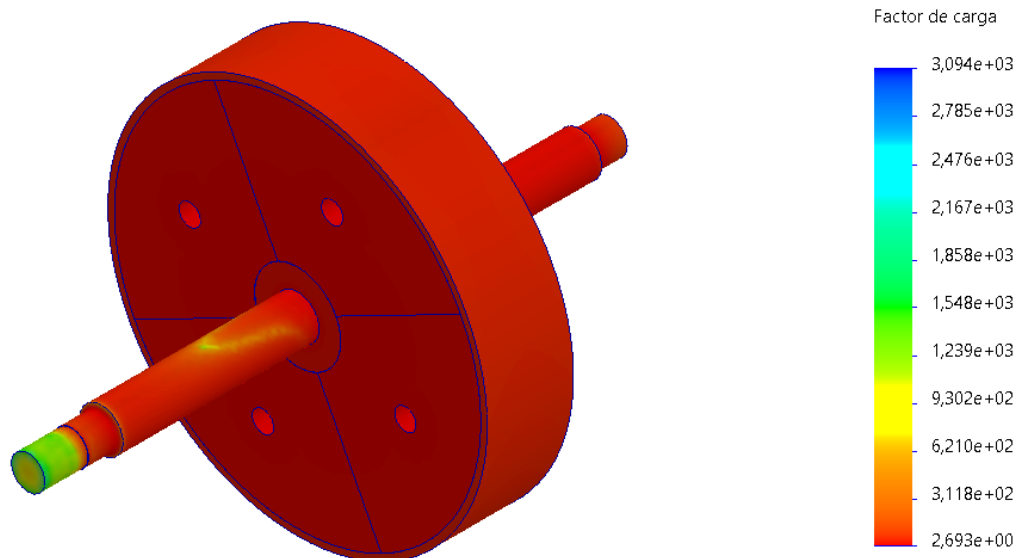


Figura 41. Factor de Carga.

En la figura 41 se muestra el factor de carga, este factor puede ocasionar fallos en el material, con las condiciones establecidas anteriormente, un factor de carga menor a 1 indicaría un fallo en el material. En el caso del eje y el rotor el factor de carga mínimo posee un valor en rojo de 2.693 lo que significa que los elementos no sufren de fallos debidos a fatiga, y un valor máximo en azul de $3.094 * 10^3$ que no es visible en los elementos.

2.2.5.6. Construcción del Giroscopio Cardánico

La construcción de las partes del dispositivo se realizó mediante proceso de mecanizado en torno y fresadora CNC asegurando la precisión requerida para el correcto funcionamiento del mismo, además se utilizó la soldadura SMAW para la unión del marco de la base.

a) Mecanizado del eje

El eje del giroscopio está hecho de acero inoxidable AISI 304 asegurando una larga vida útil sin problemas de corrosión y debido a la precisión que éste requiere se realizó en un solo montaje para evitar cualquier tipo de descentramiento y posteriores vibraciones.



Figura 42. Proceso de mecanizado del eje.



Figura 43. Eje mecanizado.

b) Mecanizado del rotor

El rotor o disco giratorio está hecho de bronce fosfórico otorgándole de igual manera una alta resistencia a la corrosión y al poseer una densidad mayor a la del acero lo hace del peso ideal para que se presenten las propiedades giroscópicas.



Figura 44. Proceso de mecanizado del rotor.



Figura 45. Rotor mecanizado.

c) Mecanizado del Semianillo

El Semianillo está hecho de aluminio 6061 haciendo de este una pieza liviana y con buenas propiedades contra la corrosión, debido a su compleja geometría y tolerancias muy pequeñas la precisión requerida era muy alta, por lo que su mecanizado se realizó en fresadora CNC, asegurando que la pieza no tenga imperfecciones debidas a la intervención del ser humano.

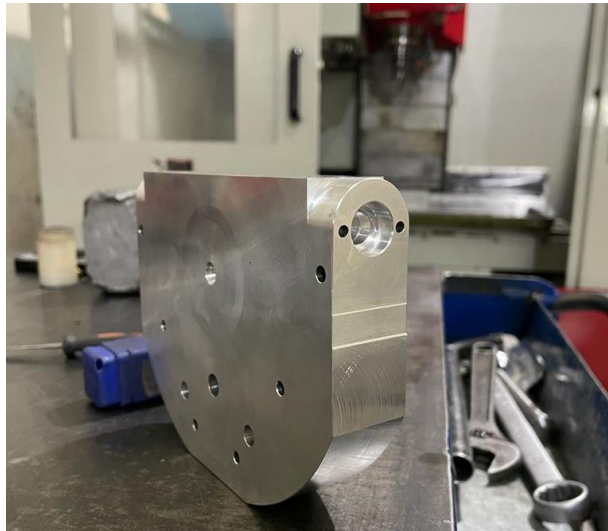


Figura 46. Proceso de mecanizado del Semianillo.



Figura 47. Semianillo Mecanizado.

d) Mecanizado del anillo

El anillo interior de igual manera está hecho de aluminio 6061 haciendo de este una pieza liviana y con buenas propiedades contra la corrosión, al poseer una geometría compleja y tolerancias muy pequeñas no era factible la intervención del ser humano por lo que el mecanizado se realizó utilizando fresadora CNC.



Figura 48. Proceso de mecanizado del anillo.



Figura 49. Anillo mecanizado.

e) Balanceo del eje y el rotor

Si un objeto que gira esta desbalanceado, vibrará. Un giroscopio tiene que estar balanceado, igual que la rueda de un coche para garantizar una conducción suave. El disco del giroscopio está fabricado de bronce y mecanizado con una precisión de centésimas, lo que garantiza que el disco sea increíblemente simétrico. En este caso el balanceo se realizó por planos.



Figura 50. Eje y rotor montados en la máquina balanceadora.

Agujeros de compensación

Como se observa en la figura 50, habrá una serie de agujeros en los costados del disco de bronce. Se comprueba si el giroscopio presenta desequilibrios. Una vez encontrados los antes mencionados, se taladran agujeros para quitar peso en partes precisas del giroscopio y balancearlo. El proceso es muy similar al balanceo de un neumático de coche, pero mucho más preciso.

f) Montaje

Una vez construidos cada uno de los elementos del giroscopio y la base se procedió a realizar el ensamblaje. El ensamblaje del eje con el rotor y los anillos se tuvo que realizar con alta precisión debido a que las tolerancias son muy pequeñas y las masas deben estar

equilibradas con respecto al centro de gravedad del sistema. Se montó la base con cada uno de sus bocines y las platinas de posicionamiento angular.

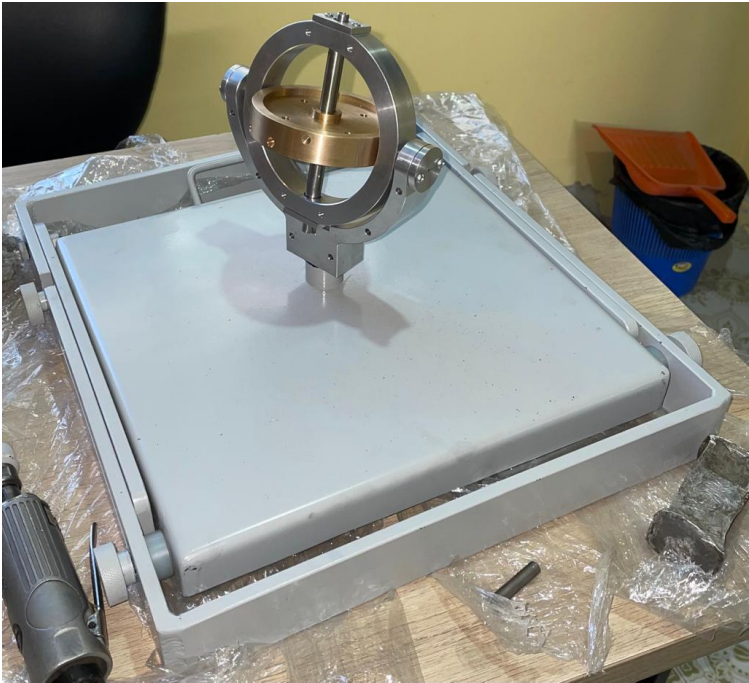


Figura 51. Giroscopio Cardánico

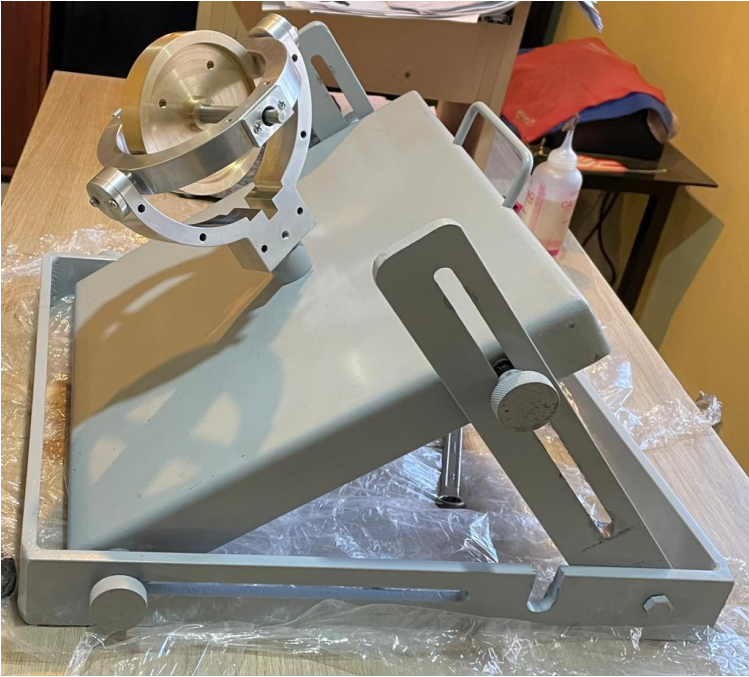


Figura 52. Giroscopio Cardánico en ángulo.

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de los resultados

3.1.1. Evaluación de funcionamiento

Para evaluar y verificar el correcto funcionamiento del dispositivo previamente diseñado y construido es necesario realizar un ensayo que permita tomar varias mediciones con las cuales se obtendrá la frecuencia de precesión y nutación a distintas velocidades angulares.

La realización de la práctica se encuentra detallada en el Anexo 2.

Con el motor damos un impulso inicial de 1600 rpm al giroscopio.

Se procede a realizar las mediciones de tiempos en segundos y velocidades angulares en revoluciones por minuto al dar un cuarto de vuelta debido a la precesión del giroscopio.

Tabla 18. Mediciones de la práctica.

No. Medición	Tiempo $\frac{1}{4}$ (s)	Velocidad giroscopio (rpm)	Masa (kg)	Tiempo 1 vuelta	Velocidad giroscopio (rps)	Frecuencia de precesión
1	4.34	1500	0.051	17.36	25	0.0576
2	4.16	1434	0.051	16.64	23.9	0.0601
3	3.91	1355	0.051	15.64	22.5833	0.0639
4	3.75	1277	0.051	15	21.2833	0.0667
5	3.50	1217	0.051	14	20.2833	0.0714
6	3.31	1137	0.051	13.24	18.95	0.0755
7	3.20	1110	0.051	12.80	18.50	0.0781
8	2.95	1048	0.051	11.80	17.4667	0.0847
9	2.83	1010	0.051	11.32	16.8333	0.0883
10	2.71	970	0.051	10.84	16.1666	0.0923
11	2.62	934	0.051	10.48	15.5667	0.0954
12	2.56	910	0.051	10.24	15.1667	0.0977

No. Medición	Tiempo $\frac{1}{4}$ (s)	Velocidad giroscopio (rpm)	Masa (kg)	Tiempo 1 vuelta	Velocidad giroscopio (rps)	Frecuencia de precesión
13	2.50	894	0.051	10	14.9	0.1000
14	2.45	885	0.051	9.8	14.75	0.1020
15	2.40	880	0.051	9.6	14.6667	0.1042

En la tabla 18 se observa que la velocidad del giroscopio disminuye y que el tiempo de un cuarto de vuelta también lo hace, es decir que aumenta la velocidad de precesión.

Una vez calculada la frecuencia de precesión del giroscopio generamos una gráfica entre la velocidad angular del giroscopio (rps) y la frecuencia de precesión, encontrando así la relación existente entre las antes mencionadas.

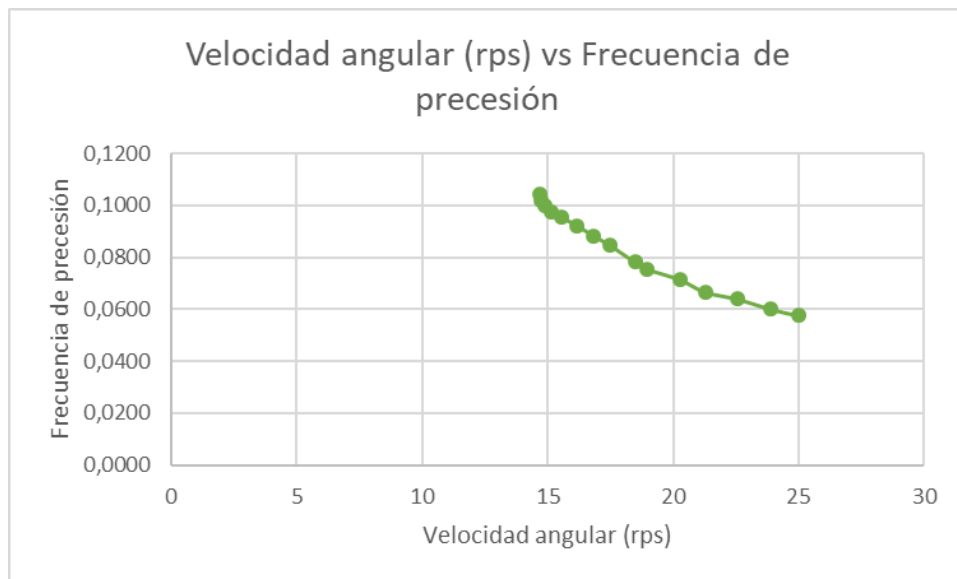


Figura 53. Velocidad angular (rps) vs Frecuencia de precesión.

En la figura 53 se observa que al aumentar la frecuencia de giro del disco disminuye la frecuencia de precesión.

Para determinar la frecuencia de nutación es preciso saber que se debe determinar los momentos de inercia de masa en los ejes X,Y,Z, por efectos de precisión utilizaremos los valores de los momentos de inercia obtenidos mediante software.

Tabla 19. Principales momentos de inercia del rotor sin masas adicionales.

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.

$$\begin{array}{ll} I_x = (1.00, 0.00, 0.00) & P_x = 297790.48 \\ I_y = (0.00, 1.00, 0.00) & P_y = 297790.48 \\ I_z = (0.00, 0.00, 1.00) & P_z = 580321.71 \end{array}$$

Se procede a obtener la frecuencia de nutación a distintas velocidades angulares en rps mediante la fórmula:

$$\omega_{nu} = \frac{I_z}{\sqrt{I_x * I_y}} * \omega_r \quad (50)$$

$$\omega_{nu1} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1500rpm}{60}\right) = 48.71$$

$$\omega_{nu2} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1450rpm}{60}\right) = 47.09$$

$$\omega_{nu3} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1400rpm}{60}\right) = 45.47$$

$$\omega_{nu4} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1350rpm}{60}\right) = 43.84$$

$$\omega_{nu5} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1300rpm}{60}\right) = 42.22$$

$$\omega_{nu6} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1250rpm}{60}\right) = 40.59$$

$$\omega_{nu7} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1200rpm}{60}\right) = 38.97$$

$$\omega_{nu8} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1100rpm}{60}\right) = 35.72$$

$$\omega_{nu9} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{1000rpm}{60}\right) = 32.47$$

$$\omega_{nu10} = \frac{580321.71}{\sqrt{(297790.48) * (297790.48)}} * \left(\frac{900rpm}{60}\right) = 29.23$$

Una vez calculados los resultados realizamos una gráfica entre la frecuencia de rotación del disco (velocidad rps) y la frecuencia de nutación para así determinar la relación existente entre estas dos.

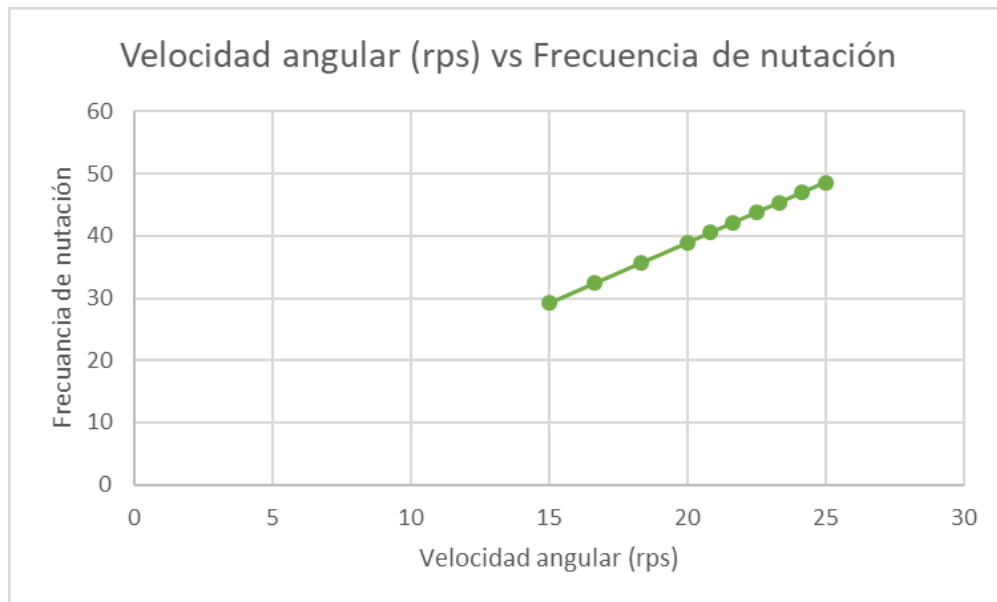


Figura 54. Velocidad angular (rps) vs Frecuencia de Nutación.

En la figura 54 se observa que al aumentar la velocidad del giroscopio aumenta también la frecuencia de nutación.

3.1.2. Costos del proyecto

Costos directos (CD)

Los costos directos considerados para la construcción de este proyecto son: la materia prima, la maquinaria utilizada y la mano de obra.

Costo de materiales (CM)

Tabla 20. Costo de materia prima.

Costo de materiales			
Cantidad	Descripción	Dimensiones	Precio (\$)
1	Bronce fosfórico barra redonda	Diámetro:100 mm Espesor: 20 mm	46.86
2	Bronce fosfórico barra redonda	Diámetro:89 mm Espesor: 8 mm	31.28
1	Aluminio 6061 barra redonda	Diámetro: 140 mm Espesor: 20 mm	17.01
1	Aluminio 6061 barra redonda	Diámetro: 180 mm Espesor: 30 mm	95.00
1	Platina	Ancho: 50 mm Espesor: 9 mm Longitud: 3000 mm	19.69
1	Lamina de hierro	Alto: 410 mm Acho:430 mm Espesor: 3 mm	10.00
1	Eje de acero inoxidable AISI 304	Diámetro: 12mm Longitud: 160mm	5.00
1	Eje de acero AISI 1018	Diámetro: 30 mm Longitud: 45 mm	10.00
1	Bronce fosfórico barra redonda	Diámetro: 20 mm Longitud: 35 mm	15.00
4	Rodamientos cerámicos de precisión	Diámetro externo: 16 mm Diámetro interno: 8 mm Espesor: 5 mm	30.00
1	Motor eléctrico	-	30.00
7	Pernos y tuercas	1/8	4.00
16	Tornillos	M4	5.00
1	Eje de acero AISI 1018	Diámetro: 17 mm Longitud: 200 mm	10.00
1	Tacómetro laser digital	-	50.00
TOTAL			378.84

En la tabla 20 se hallan los precios de los materiales necesarios para la construcción del giroscopio, dando como resultado un total de \$378.84 dólares americanos.

Costos de maquinaria utilizada y mano de obra (CMMO)

Tabla 21. Costos de maquinaria y mano de obra.

Costo de maquinaria utilizada y mano de obra	
Descripción	Precio (\$)
Mecanizado en fresadora CNC	500
Mecanizado en cortadora de hilo	70
Mano de obra	600
TOTAL	1170

En la tabla 21 se hallan los precios de la maquinaria utilizada y mano de obra, dando como resultado un total de \$1170 dólares americanos.

Total, Costos Directos (CD)

Tabla 22. Costos directos totales.

Total, Costos Directos	
Descripción	Precio (\$)
Costo de materiales (CM)	378.84
Costo de maquinaria y mano de obra (CMMO)	1170
TOTAL	1548.84

En la tabla 22 se hallan los costos directos totales, dando como resultado un valor total de \$1548.84 dólares americanos.

Costos Indirectos (CI)

Este tipo de costos son complementarios y no afectan de manera directa en la construcción del dispositivo, pero forman parte del proceso de producción.

Tabla 23. Costos Indirectos.

Costos Indirectos	
Descripción	Precio (\$)
Impresiones	7.00
Combustible	40.00
TOTAL	47.00

En la tabla 23 se hallan los costos indirectos totales, dando un valor total de \$47.00 dólares americanos.

Costo Total del Proyecto

Es la suma total del total, costos directos (CD) y los costos indirectos (CI).

Tabla 24. Costo total del proyecto.

Costo Total del Proyecto	
Descripción	Precio (\$)
Costos directos totales (CD)	1548.84
Costos indirectos (CI)	47.00
TOTAL	1595.84

En la tabla 24 se halla el costo total del proyecto, dando un valor de \$1595.84 dólares americanos.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se investigó acerca de las leyes físicas que rigen el dispositivo, su funcionamiento y diseños, lo que permitió una clara comprensión de para que se creó el giroscopio en un inicio y la importancia del mismo en el desarrollo de la tecnología actual dentro del campo de la Ingeniería Mecánica.
- Se determinó los parámetros requeridos para el diseño de un giroscopio, para lo cual se efectuaron estudios correspondientes a las dimensiones preliminares del giroscopio en función del lugar en el que va a ser ubicado y los diseños disponibles en el mercado.
- Se seleccionó para la construcción el modelo del Giroscopio Cardánico debido a que éste obtuvo la mejor valoración según el método ordinal de criterios ponderados, por lo que se concluye que era el más adecuado para el caso de estudio.
- Se diseñó un giroscopio montado en una suspensión cardan que puede tomar cualquier orientación, está constituido por un rotor o disco que gira entorno a un eje principal de inercia, el cual reposa en el marco interior del anillo cardán, este marco a su vez está conectado con el marco exterior llamado Semianillo del cardan mediante otro eje que permite su rotación, los tres ejes de rotación son perpendiculares entre si otorgándole 3 grados de libertad y todos ellos se cruzan en el centro de gravedad del sistema. Concluyendo que es un modelo funcional y que permite realizar prácticas estudiantiles en los Laboratorios de la Carrera de Mecánica.
- Se construyó cada uno de los elementos del giroscopio con suma precisión mediante distintos procesos de mecanizado como torneado y fresado CNC para posteriormente ensamblarlos y dar como resultado un dispositivo de calidad.
- Se evaluó el correcto funcionamiento del giroscopio realizando varias mediciones que permitieron la obtención de la frecuencia de precesión y nutación a distintas velocidades angulares.
- Se determinó que al aumentar la frecuencia de giro del giroscopio disminuye la frecuencia de precesión, es inversamente proporcional.

- Se determinó que al aumentar la velocidad del giroscopio también aumenta la frecuencia de nutación, es directamente proporcional.

4.2.Recomendaciones

- Evitar apoyarse sobre el giroscopio.
- Iniciar lentamente el impulso inicial hasta vencer la inercia del rotor.
- Revisar que el acople de conexión del eje y el motor se encuentre en buen estado.
- Conectar el motor al eje suavemente sin forzar.
- Comprobar que después de la práctica no queden atornilladas masas adicionales sobre el anillo cardán.
- Realizar las mediciones entre 2 o 3 personas de preferencia.
- Guardar todos los instrumentos en su respectivo lugar después de realizar la práctica.
- Evitar tocar el rotor cuando este se encuentra en movimiento o colocar cualquier objeto sobre él ya que podría salir proyectado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Newton y N. W. Chittenden, *Newton's Principia: The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, United States of America: Franklin Classics, 2018.
- [2] J. L. Meriam, L. G. Kraige y J. N. Bolton, *Engineering Mechanics DYNAMICS*, United States of America: Wiley, 2018.
- [3] G. Greenhill, *Report on Gyroscopic Theory*, United States of America: BiblioBazaar, 2016.
- [4] M. J. Benacquista y J. D. Romano, *Classical Mechanics*, New York: Springer, 2018.
- [5] S. K. Range y J. Mullins, *Brief History of Gyroscopes*, 2015.
- [6] F. Klein y A. Sommerfeld, *The Theory of the Top. Volume IV: Technical Applications of the Theory of the Top*, New York: Springer, 2016.
- [7] G. Iurato, «On the historical evolution of gyroscopic instrumentation: a very brief account.,» HAL Id: hal-01136829, 2015. [En línea]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01136829/document>.
- [8] E. -. Laboratories, *The Anschutz Gyro-Compass and Gyroscope Engineering*, Kiel, Germany: Watchmaker Publishing, 2003.
- [9] V. M. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani, M. De Carlo y C. E. Campanella, «Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective.,» *Sensors*, vol.17, no. 10, p. 2284, 7 October 2017. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17102284>.
- [10] D. Senkal y A. M. Shkel, *Whole-Angle MEMS Gyroscopes: Challenges and Opportunities*, Canada: John Wiley & Sons, 2020.
- [11] H. Crew, *The Principles of Mechanics: For Students of Physics and Engineering (Classic Reprint)*, London: FB&C Limited, 2018.
- [12] S. T. Thornton y J. B. Marion, *Classical Dynamics of Particles and Systems*, United States of America: Cengage Learning, 2021.
- [13] J. R. Taylor, *Mecánica Clásica*, Barcelona - España: Reverté, 2018.
- [14] R. Usubamatov, *Theory of Gyroscopic Effects for Rotating Objects*, Singapore: Springer, 2020.

- [15] C. S. Herrman, «SSRN,» [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1373976>. [Último acceso: 10 Mayo 2022].
- [16] V. M. Niño Rojas, Metodología de la investigación., Bogotá, Colombia: Ediciones de la U, 2019.
- [17] DIPAC, «DIPAC Priductos de Acero,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.dipacmanta.com/Catalogos-descargas/catalogo-2020.pdf>. [Último acceso: 15 Mayo 2022].
- [18] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, Ciencia e Ingeniería de Materiales, Barcelona: Reverté, S. A., 2018.
- [19] G. Queijo García, Fundamentos de Tecnología Eléctrica, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia , 2020.
- [20] F. . J. Luque Romera, Máquinas, herramintas y materiales de procesos básicos de fabricación, Málaga: Ic , 2012.
- [21] P. S. G. & C. KG, «PHYWE excellence in science,» PHYWE Systeme GmbH & Co. KG, [En línea]. Available: <https://www.phywe.com/es/>. [Último acceso: 20 Junio 2022].
- [22] C. Riba Romeva, Diseño Concurrente, Barcelona: Univ. Politec. de Catalunya, 2010.
- [23] M. Bestratén Belloví, A. Hernández Calleja, P. Luna Mendaza, C. Nogareda Cuixart, S. Nogareda Cuixart, M. Oncins De Frutos y D. Solé Gómez, Ergonomía, Madrid: Instituto Nacional de Seguridad e Higienete en el Trabajo, 2008.
- [24] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México, D.F.: McGraw-Hill, 2012.
- [25] G. SKF, «Rodamientos,» *Catálogo de rodamientos SKF*, vol. 1.6, nº PUB BU/P1 17000/1 ES, p. 1152, 2019.
- [26] Sesame, «Sesame,» Sesame, 2023. [En línea]. Available: https://www.sesamemotor.com/product_detail/en/small-ac-motors-spds. [Último acceso: 2 01 2023].

ANEXOS

Anexo 1. Guía de funcionamiento y mantenimiento

Guía de funcionamiento del Giroscopio

1. Para que el giroscopio inicie su funcionamiento es necesario darle torque con el motor de velocidad variable accionado mediante pedal.
2. El motor poseerá un acople para la conexión con el eje, conectar con cuidado y sin forzar en la misma dirección del eje del giroscopio.
3. Es necesario y primordial empezar a dar torque lentamente hasta vencer la inercia del rotor, caso contrario el acople podría sufrir daños.
4. Al momento de desacoplar el eje del motor con el eje del giroscopio, no se debe detener el motor, la operación debe realizarse en movimiento. Caso contrario el mecanismo se detendría forzosamente, provocando daños graves como ruptura del eje del giroscopio o del acople.
5. Las pesas suplementarias del rotor permiten cambiar los momentos de inercia de masa del rotor para la práctica de frecuencia de nutación.
6. Las pesas suplementarias del anillo cardán nos permiten causar la precesión del giroscopio.
7. Se coloca una tira refractiva en la periferia del rotor para poder realizar las mediciones de la velocidad angular con el tacómetro digital.
8. Con un cronómetro se mide el tiempo que tarda el giroscopio en dar un cuarto de vuelta debido a la precesión.
9. Una vez terminada la práctica asegurarse de que no queden atornilladas masas suplementarias en el anillo cardan.
10. La base del giroscopio puede posicionarse en distintos ángulos dependiendo del caso de estudio. Simulando latitudes para el experimento de brújula giroscópica.

Guía de Mantenimiento y limpieza

1. Dándole un uso cuidadoso y normal el giroscopio nunca debería necesitar mantenimiento o reparación.

2. Si el giroscopio se cae, es muy probable que sufra daños y desbalanceo lo que provocaría vibraciones, no golpear el eje ya que podría afectar a los rodamientos.
3. Engrasar periódicamente los bocines de la base para su correcto funcionamiento y evitar desgaste por fricción.
4. Cuando no se utilice cubrir el giroscopio para evitar la acumulación de polvo.
5. De no cubrir la limpieza debe ser diaria, limpiar todo el dispositivo dejándolo libre de polvo o suciedad.
6. Evitar condiciones de humedad.

Anexo 2. Práctica del Giroscopio

PRACTICA DEL GIROSCOPIO

Los materiales que se van a utilizar para la realización de la siguiente práctica son:

- 1 giroscopio
- 1 tacómetro laser digital
- 1 cronómetro

Objetivos de la práctica

1. Encontrar la relación existente entre la frecuencia de precesión y la velocidad angular del giroscopio (inversamente proporcional).
2. Encontrar la relación entre la frecuencia de nutación y la velocidad angular del giroscopio (directamente proporcional).

Montaje y realización de la práctica

El giroscopio se monta sobre una superficie lisa y plana asegurando que no se hallen masas suplementarias sobre los ejes o en el rotor. Éste debe hallarse en posición de equilibrio indiferente en todas las direcciones y por lo tanto permanecer en cualquier posición sin oscilar.

Para la determinación de la frecuencia de precesión se atornillan las masas suplementarias en el cojinete del eje del giroscopio. Se colocan dos flechas en los extremos del Semianillo para medir el tiempo que tarda el giroscopio en completar un cuarto de vuelta.

Se conecta el eje del motor con el eje del giroscopio para ponerlo en movimiento, la velocidad angular se mide con el tacómetro laser y la frecuencia de precesión con el cronómetro.

Se anota en una tabla el tiempo en segundos que tarda el giroscopio en dar un cuarto de vuelta debido a la precesión y con el tacómetro laser se mide simultáneamente en revoluciones por minuto la velocidad de rotación del disco.

No. Medición	Tiempo ¼ (s)	Velocidad giroscopio (rpm)	Masa	Tiempo 1 vuelta	Velocidad giroscopio (rps)	Frecuencia de precesión
1						
⋮						
15						

El tiempo de una vuelta completa lo obtenemos multiplicando el tiempo de un cuarto de vuelta por cuatro. La frecuencia de precesión se obtiene calculando la inversa del tiempo en una vuelta.

Con los datos obtenidos se realiza una gráfica utilizando la frecuencia de rotación del disco (velocidad rps) y la frecuencia de precesión.

Para la determinación de la frecuencia de nutación se quitan las masas suplementarias, un breve golpe en uno de los extremos del anillo produce la nutación. Se miden las frecuencias de nutación para distintas velocidades del giroscopio mediante la fórmula:

$$\omega_{nu} = \frac{I_z}{\sqrt{I_x * I_y}} * \omega_r$$

Donde:

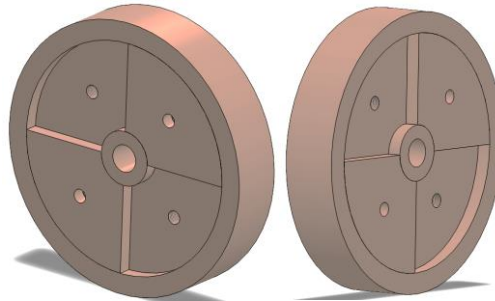
- $\omega_r = \text{velocidad angular en rps}$

Principales momentos de inercia del rotor sin masas adicionales.

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.

$I_x = (1.00, 0.00, 0.00)$	$P_x = 297790.48$
$I_y = (0.00, 1.00, 0.00)$	$P_y = 297790.48$
$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_z = 580321.71$

Principales momentos de inercia del rotor con 4 masas adicionales colocadas es decir 2 a un lado y dos al otro lado.



Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.

$I_x = (1.00, 0.00, 0.00)$	$P_x = 422267.23$
$I_y = (0.00, 1.00, 0.00)$	$P_y = 422267.23$
$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_z = 802223.57$

Principales momentos de inercia del rotor con 8 masas adicionales.

Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el centro de masa.

$I_x = (1.00, 0.00, 0.00)$	$P_x = 546743.97$
$I_y = (0.00, 1.00, 0.00)$	$P_y = 546743.97$
$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_z = 1024125.44$

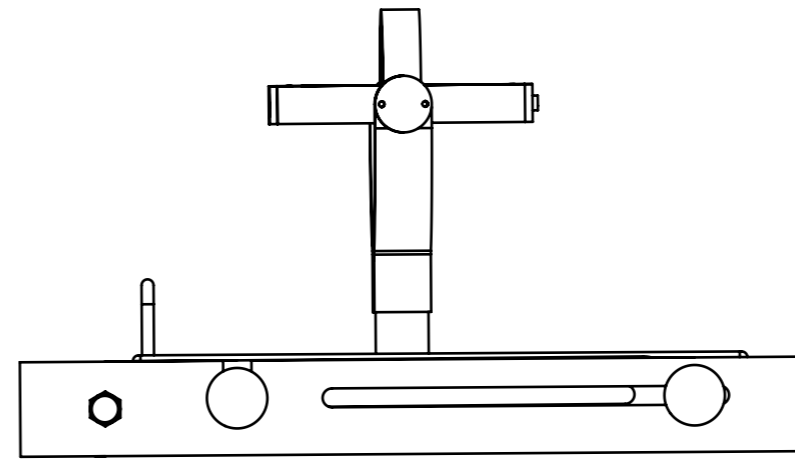
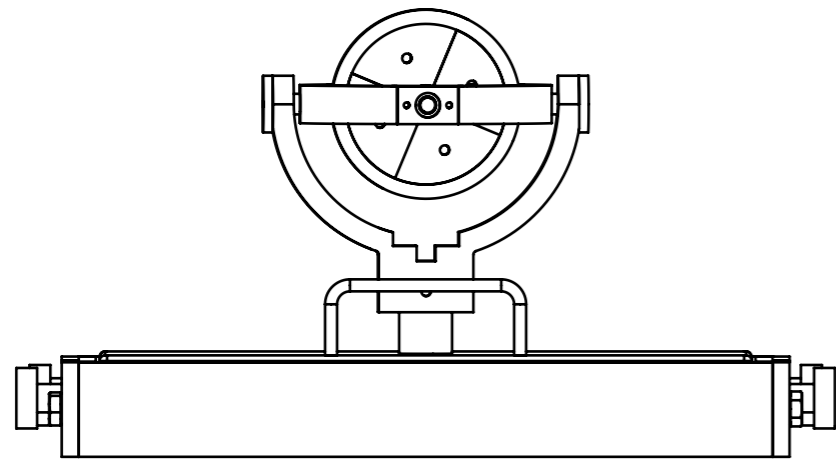
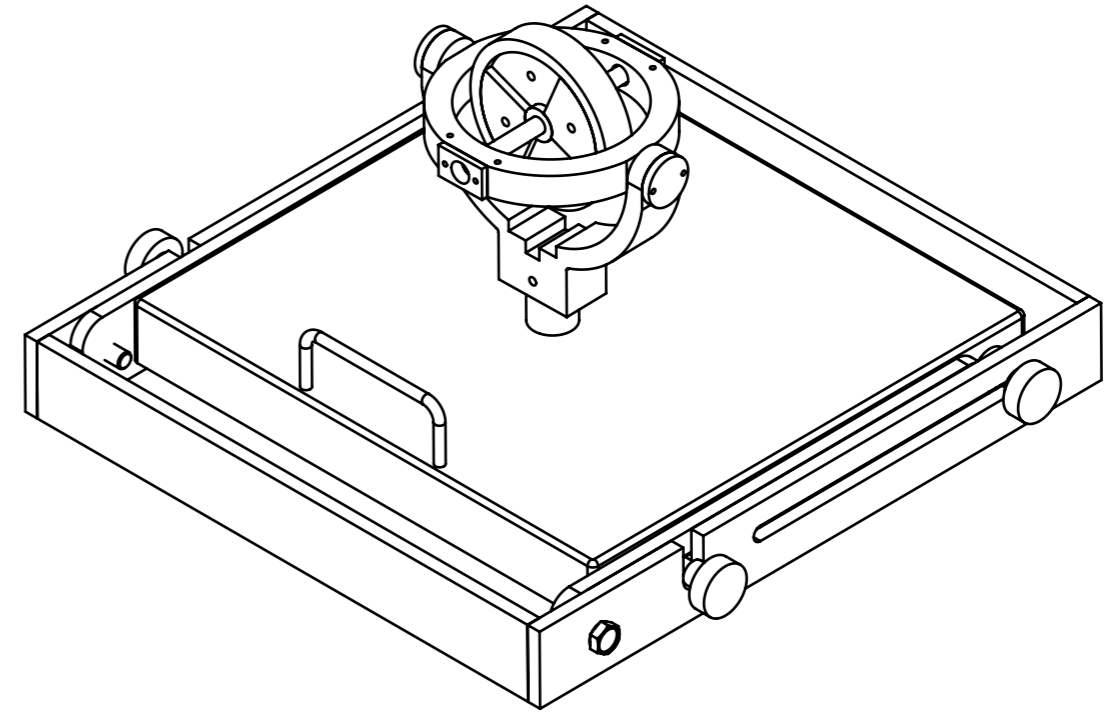
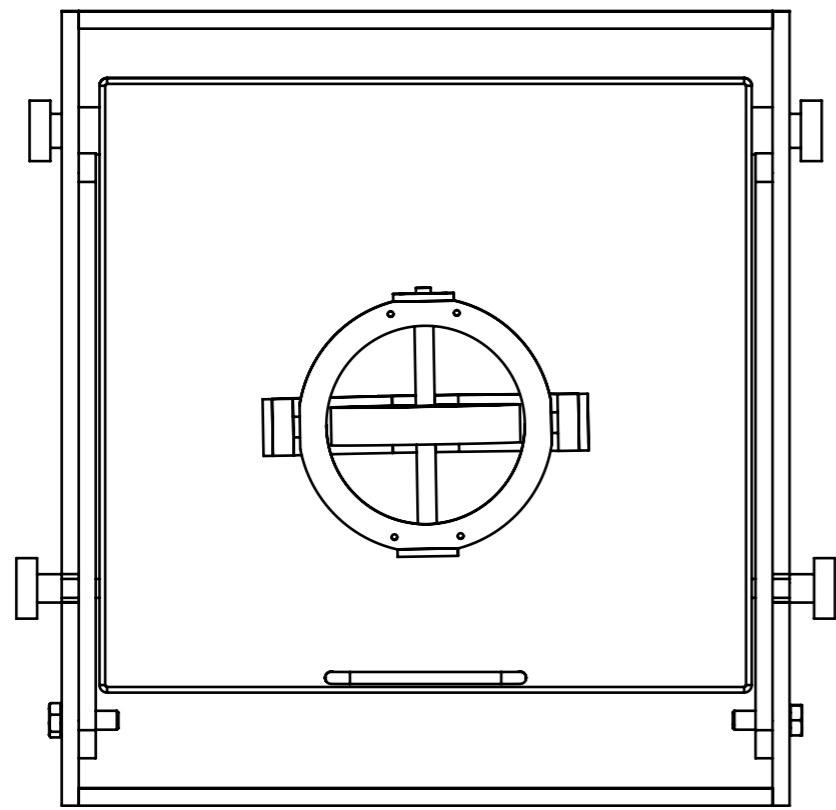
Brújula giroscópica

Una de las aplicaciones del giroscopio es la llamada brújula giroscópica, mediante la cual se puede determinar la dirección del norte geográfico. El giroscopio se sitúa de modo que su eje se conserve en posición horizontal. Se simula la rotación de la tierra colocando el

giroscopio en un taburete giratorio, inclinando el plano horizontal se simula la latitud del lugar. Para simplificar se supone que inicialmente el eje del giroscopio señala la dirección este – oeste, al girar la tierra el plano horizontal y la dirección este – oeste rotan de la misma manera lo que equivale a aplicar un momento en la dirección sur – norte y el eje del giroscopio bajo su efecto girará señalando el norte geográfico.

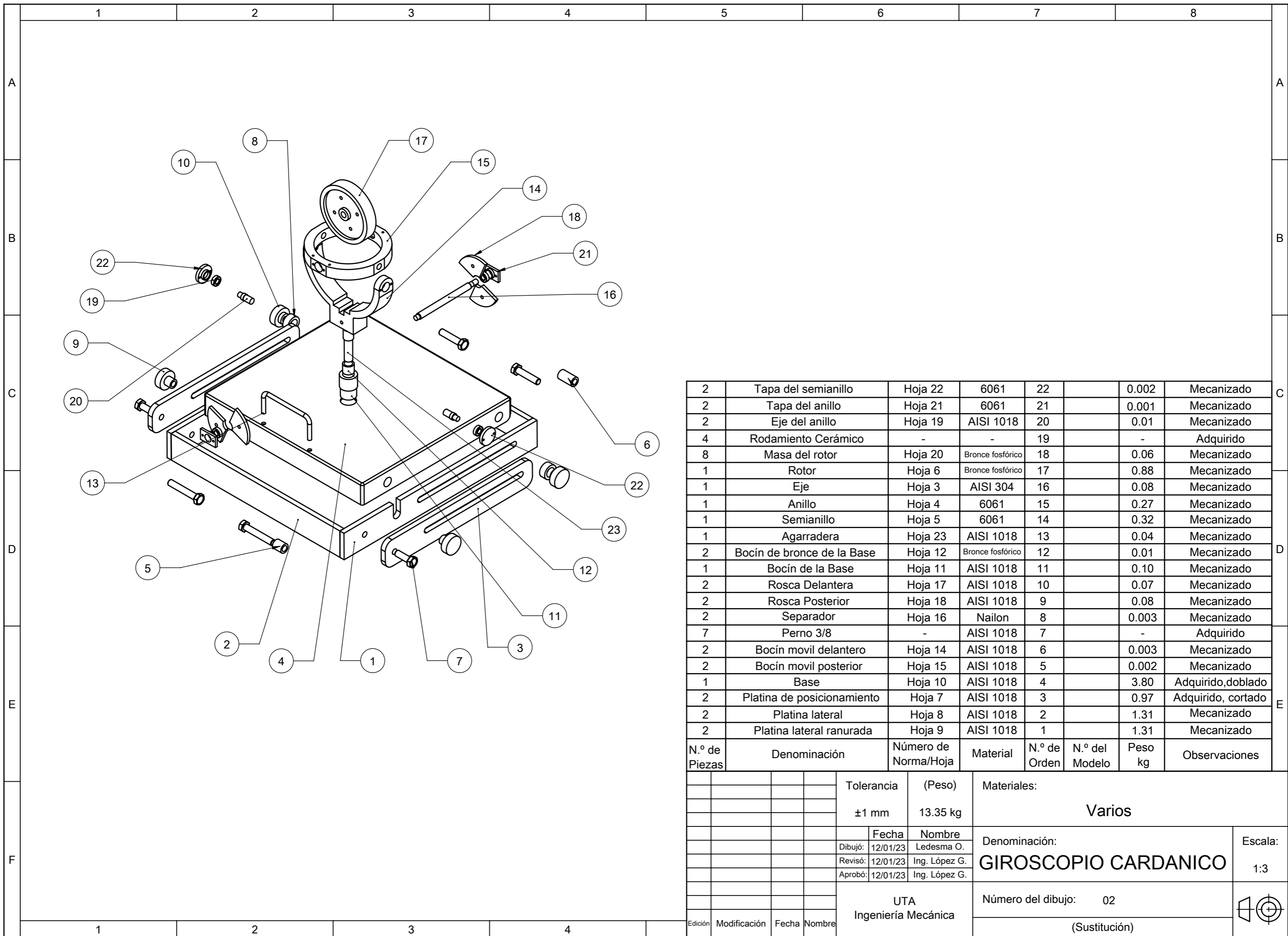
Dependiendo del sentido de giro del taburete se observa que el giroscopio apunta al norte o al sur debido al cambio de signo del momento que lo produce.

Anexo 3. Planos del Giroscopio



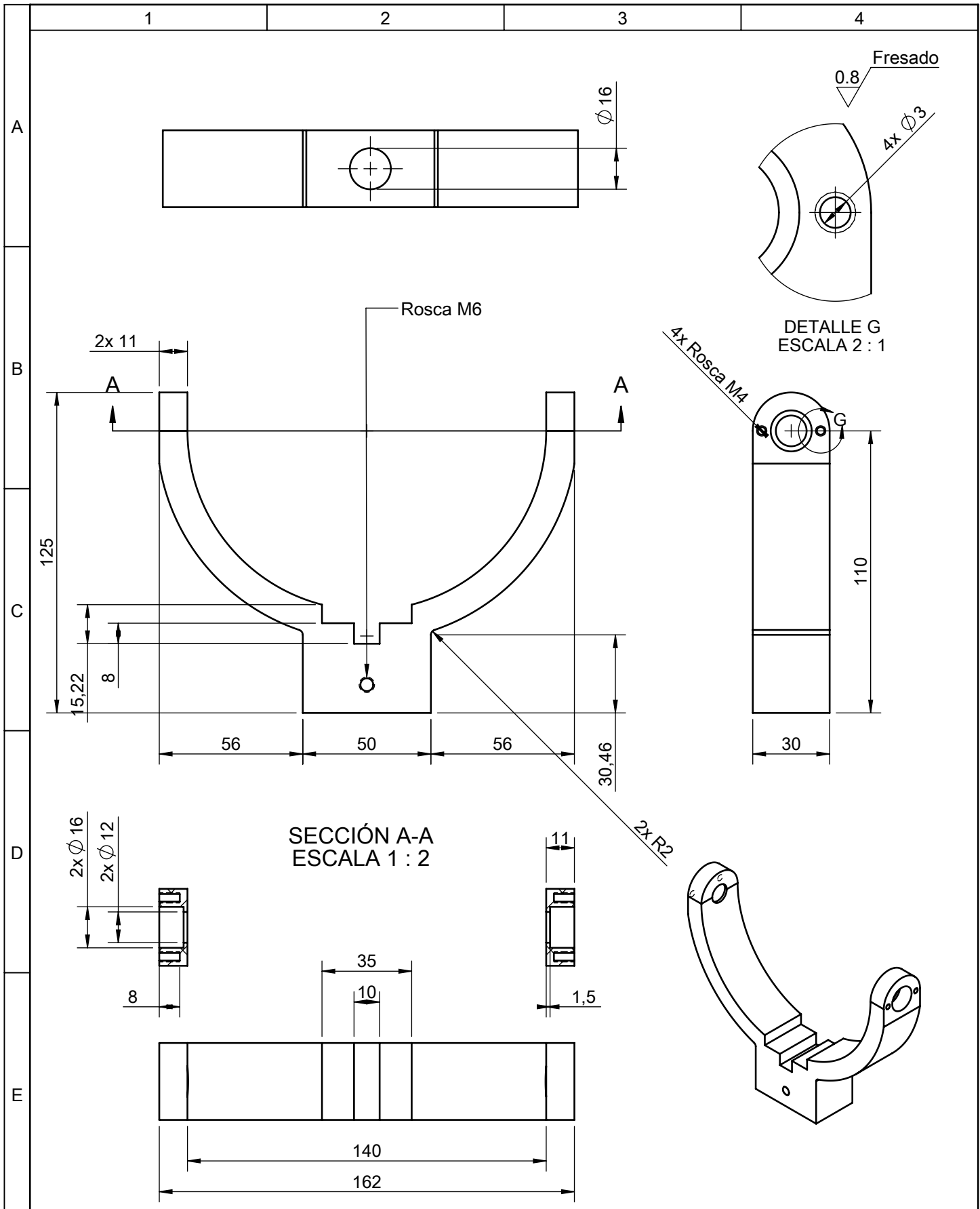
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±1 mm	13.35 kg	Varios	
					Fecha	Nombre	Denominación: GIROSCOPIO CARDANICO
				Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.	
				Revisó:	12/01/23	Ing. López G.	
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	Número del dibujo: 01 (Sustitución)
				UTA Ingeniería Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				Escala: 1:1

Technical drawing grid with columns 1-8 and rows A-F. The drawing area contains four views of a gyroscope assembly: top view, isometric view, front view, and side view. The title block at the bottom right contains technical specifications and a revision table.

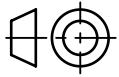


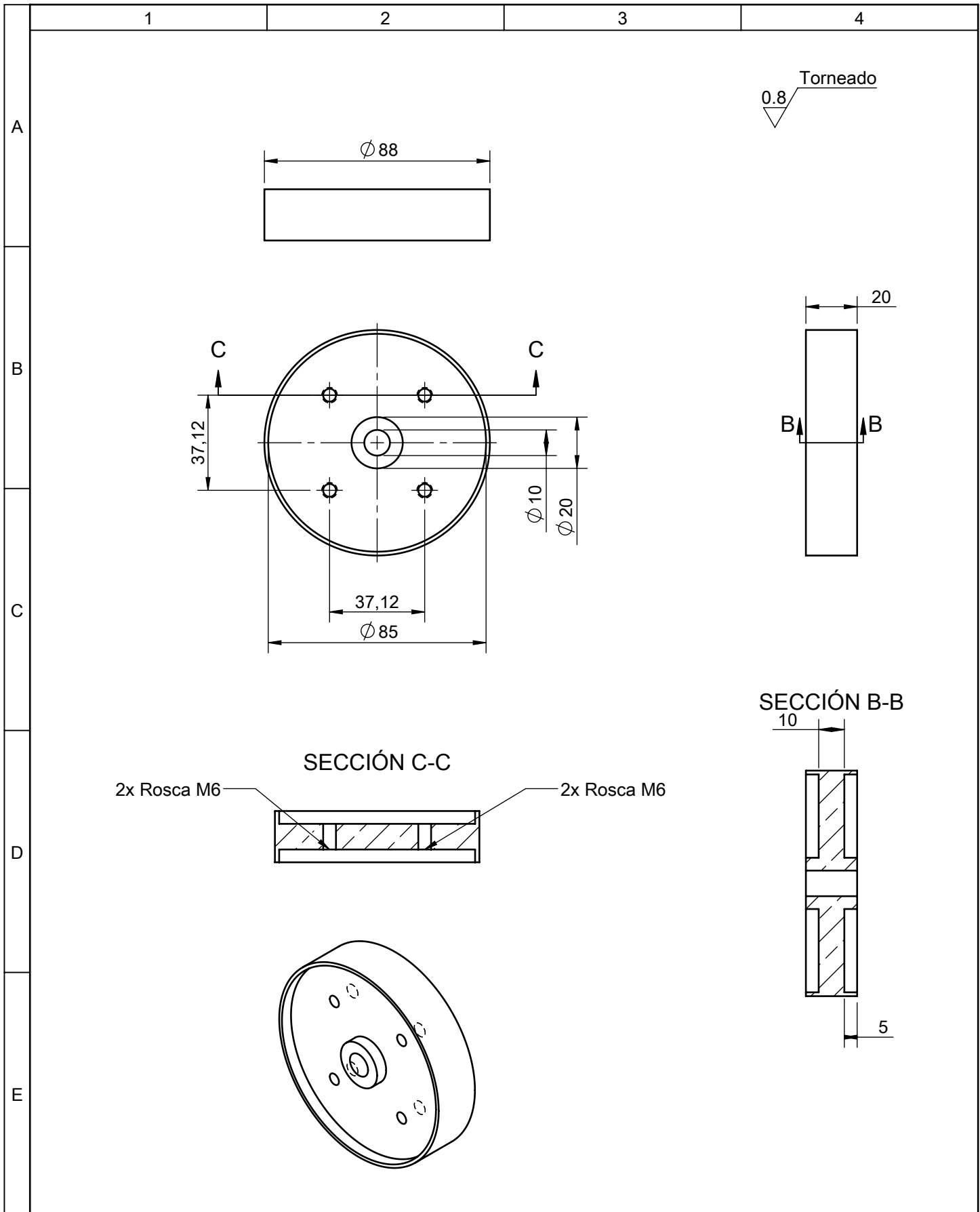
2	Tapa del semianillo	Hoja 22	6061	22		0.002	Mecanizado
2	Tapa del anillo	Hoja 21	6061	21		0.001	Mecanizado
2	Eje del anillo	Hoja 19	AISI 1018	20		0.01	Mecanizado
4	Rodamiento Cerámico	-	-	19		-	Adquirido
8	Masa del rotor	Hoja 20	Bronce fosfórico	18		0.06	Mecanizado
1	Rotor	Hoja 6	Bronce fosfórico	17		0.88	Mecanizado
1	Eje	Hoja 3	AISI 304	16		0.08	Mecanizado
1	Anillo	Hoja 4	6061	15		0.27	Mecanizado
1	Semianillo	Hoja 5	6061	14		0.32	Mecanizado
1	Agarradera	Hoja 23	AISI 1018	13		0.04	Mecanizado
2	Bocín de bronce de la Base	Hoja 12	Bronce fosfórico	12		0.01	Mecanizado
1	Bocín de la Base	Hoja 11	AISI 1018	11		0.10	Mecanizado
2	Rosca Delantera	Hoja 17	AISI 1018	10		0.07	Mecanizado
2	Rosca Posterior	Hoja 18	AISI 1018	9		0.08	Mecanizado
2	Separador	Hoja 16	Nailon	8		0.003	Mecanizado
7	Perno 3/8	-	AISI 1018	7		-	Adquirido
2	Bocín movil delantero	Hoja 14	AISI 1018	6		0.003	Mecanizado
2	Bocín movil posterior	Hoja 15	AISI 1018	5		0.002	Mecanizado
1	Base	Hoja 10	AISI 1018	4		3.80	Adquirido, doblado
2	Platina de posicionamiento	Hoja 7	AISI 1018	3		0.97	Adquirido, cortado
2	Platina lateral	Hoja 8	AISI 1018	2		1.31	Mecanizado
2	Platina lateral ranurada	Hoja 9	AISI 1018	1		1.31	Mecanizado
N.º de Piezas	Denominación	Número de Norma/Hoja	Material	N.º de Orden	N.º del Modelo	Peso kg	Observaciones

Tolerancia		(Peso)		Materiales:			
±1 mm		13.35 kg		Varios			
Fecha		Nombre		Denominación:			Escala:
Dibujó: 12/01/23		Ledesma O.		GIROSCOPIO CARDANICO			1:3
Revisó: 12/01/23		Ing. López G.					
Aprobó: 12/01/23		Ing. López G.					
UTA Ingeniería Mecánica				Número del dibujo: 02			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	(Sustitución)			

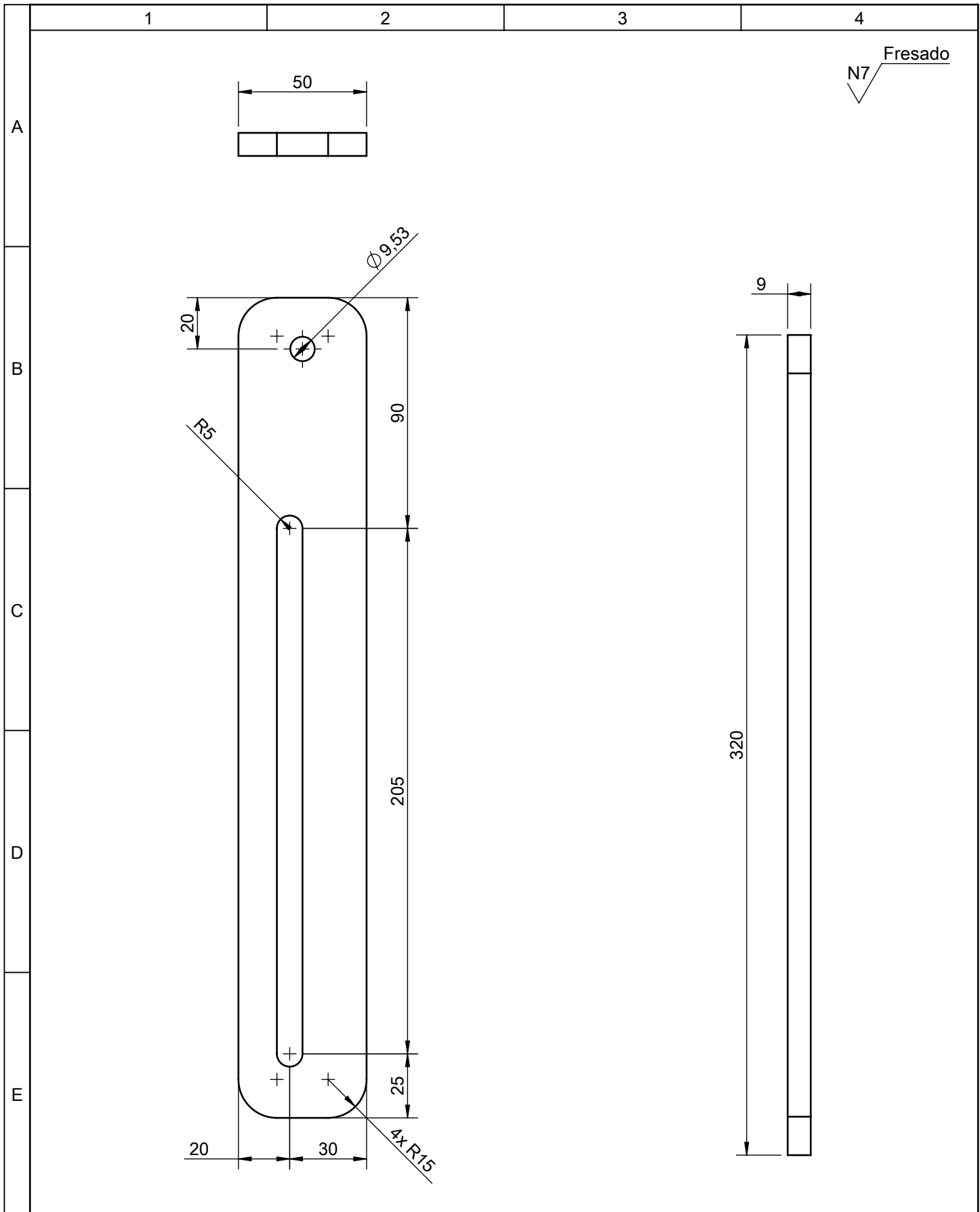


				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.3 mm	325.62 g	Aluminio 6061	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.		
			Revisó:	12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	1:2
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo:	05
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

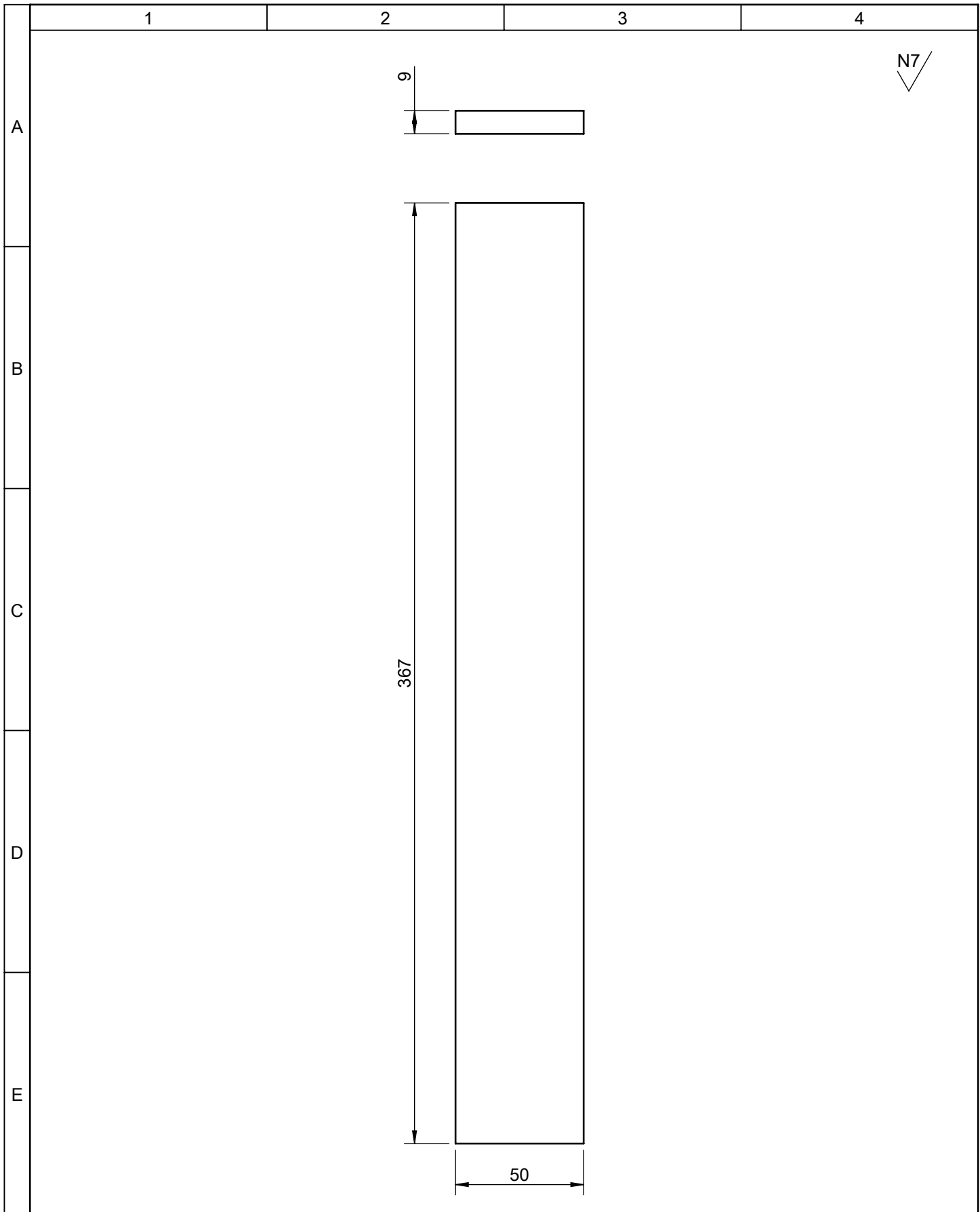


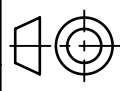


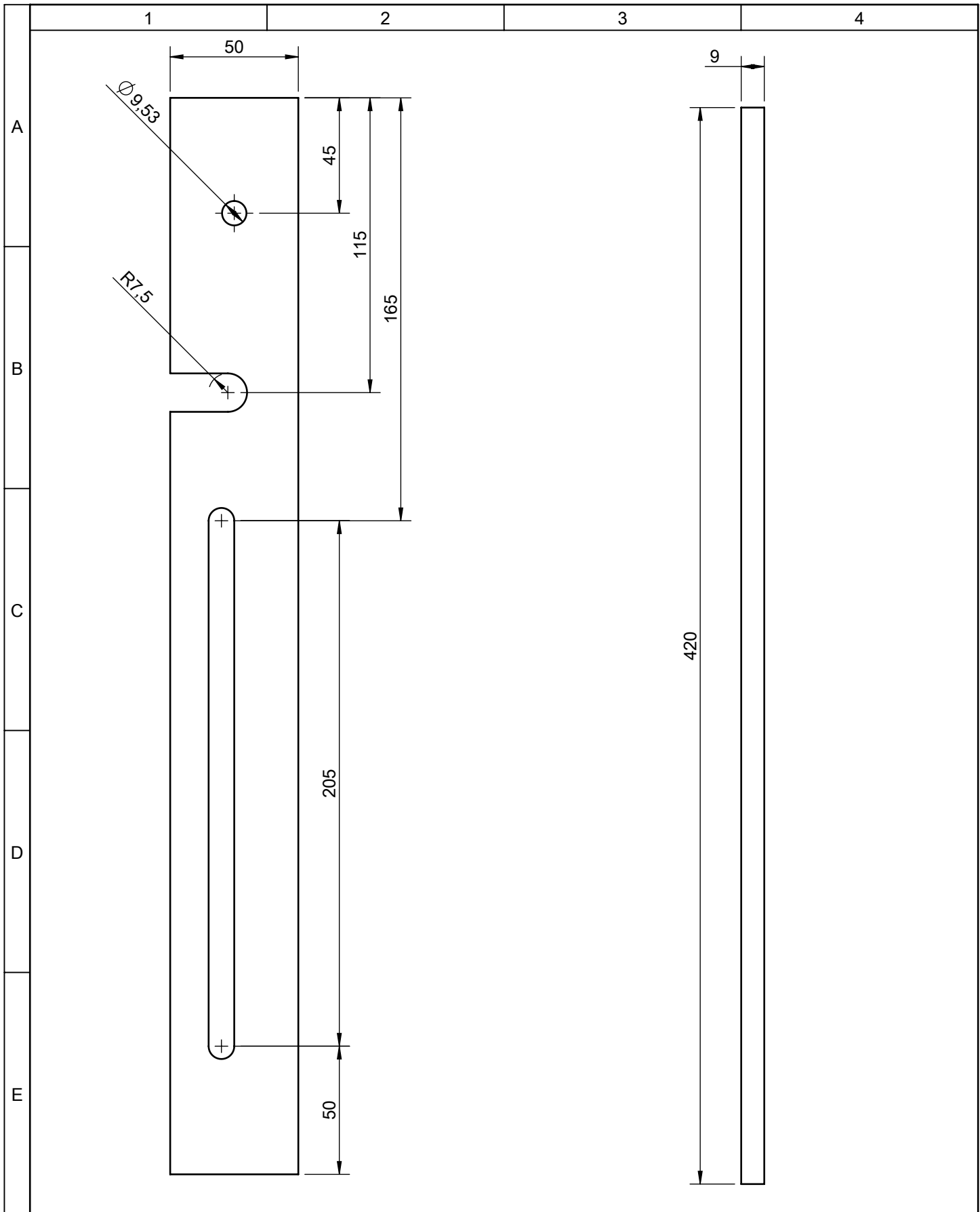
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				± 0.3 mm	576.70 g	Bonce Fosfórico	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.		
			Revisó:	12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	1:2
				UTA		Número del dibujo: 06	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Ingeniería Mecánica		(Sustitución)	



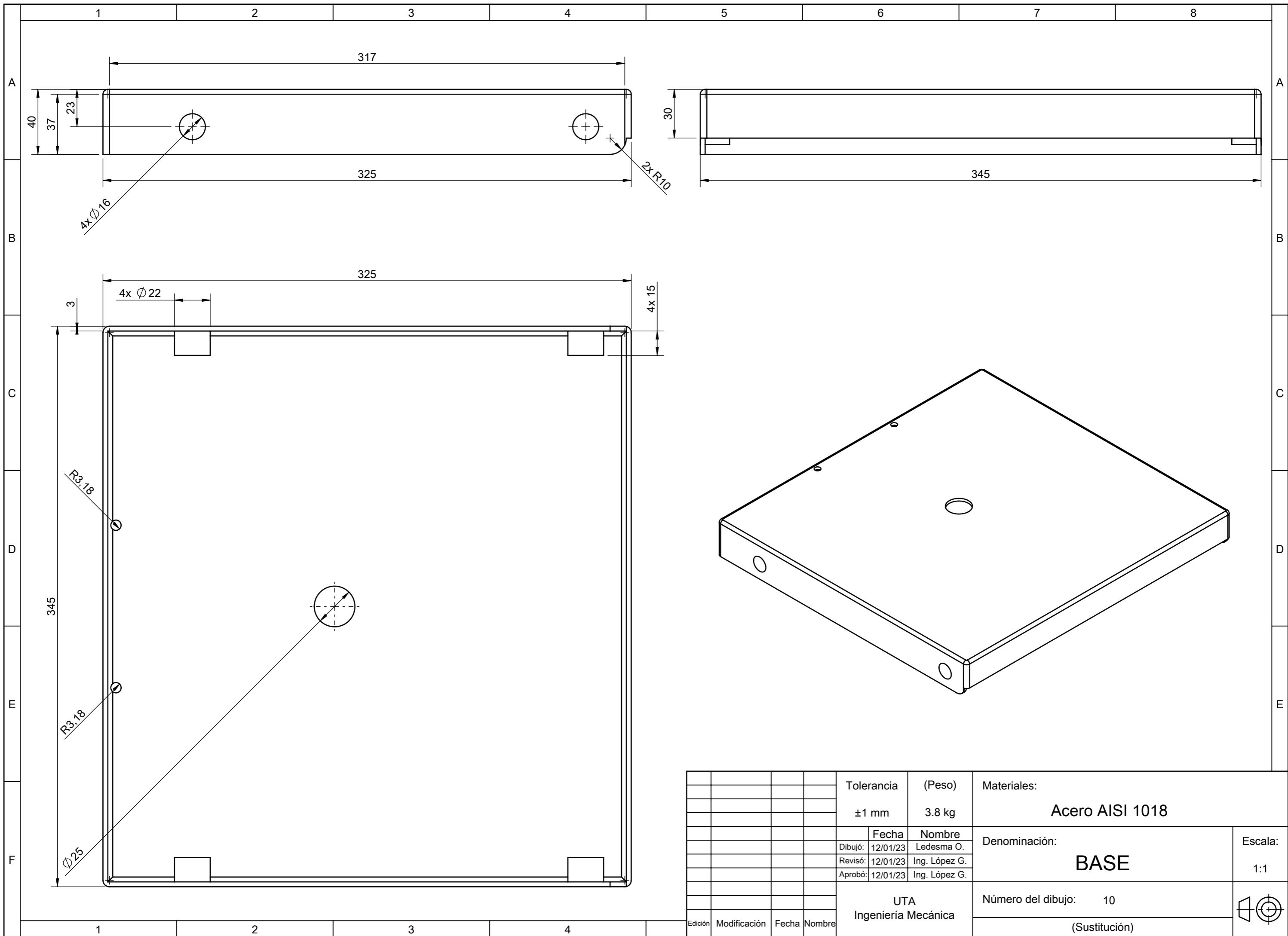
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±1 mm	0.97 kg	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.		
			Revisó:	12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	1:2
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 07	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



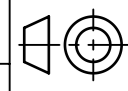
				Tolerancia	(Peso)	Materiales: Acero AISI 1018			
				±1 mm	1.31 kg				
					Fecha	Nombre	Denominación: PLATINA LATERAL		Escala: 1:2
				Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.			
				Revisó:	12/01/23	Ing. López G.			
					Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.		
				UTA Ingeniería Mecánica			Número del dibujo: 08		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				(Sustitución)		



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				± 1 mm	1.31 kg	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.		
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.	PLATINA LATERAL RANURADA	1:2
				UTA Ingeniería Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



					Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
					±1 mm	3.8 kg	Acero AISI 1018	
						Fecha	Nombre	Denominación:
					Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.	
					Revisó:	12/01/23	Ing. López G.	
						Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.
					UTA		Número del dibujo: 10	
					Ingeniería Mecánica		(Sustitución)	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					Escala:
								1:1



1

2

3

4

N7 Torneado

A

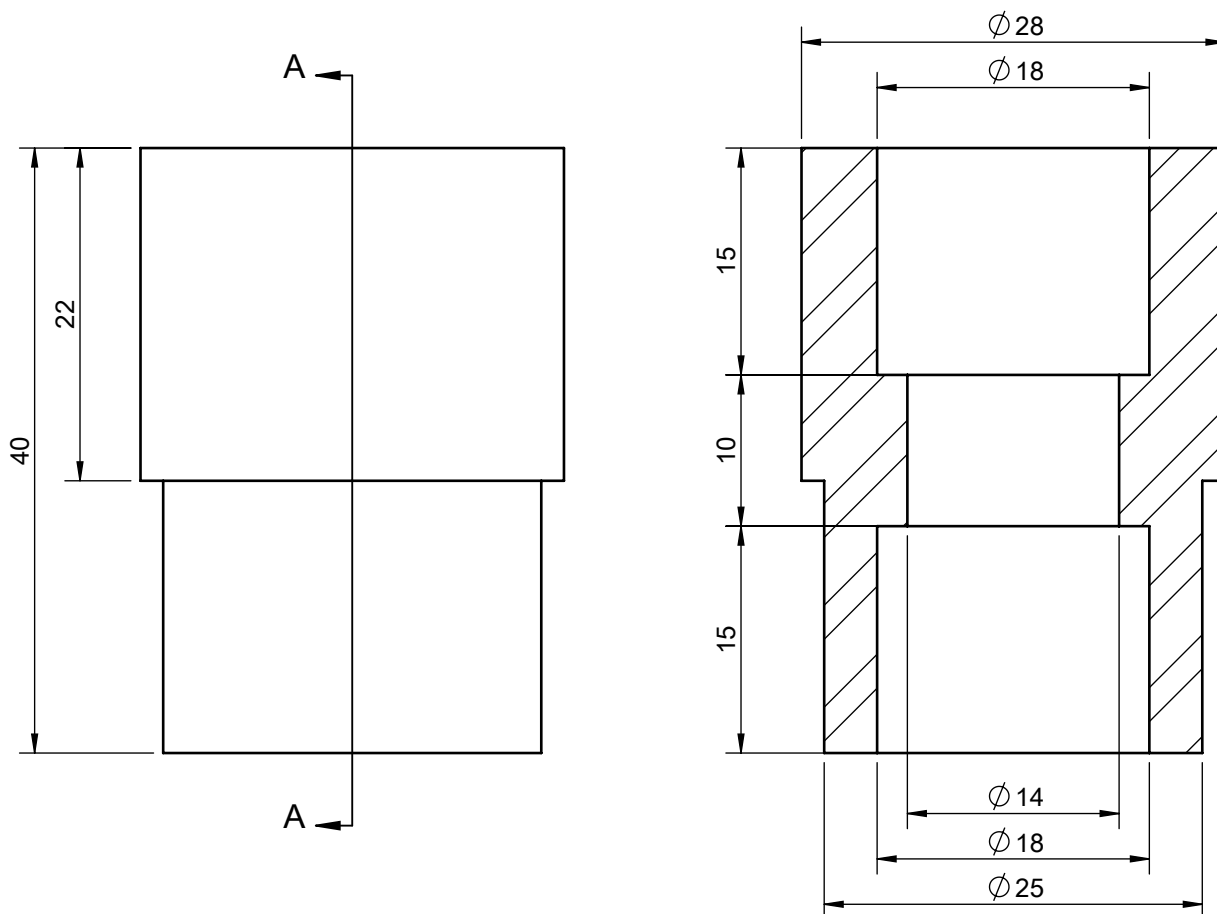
B

C

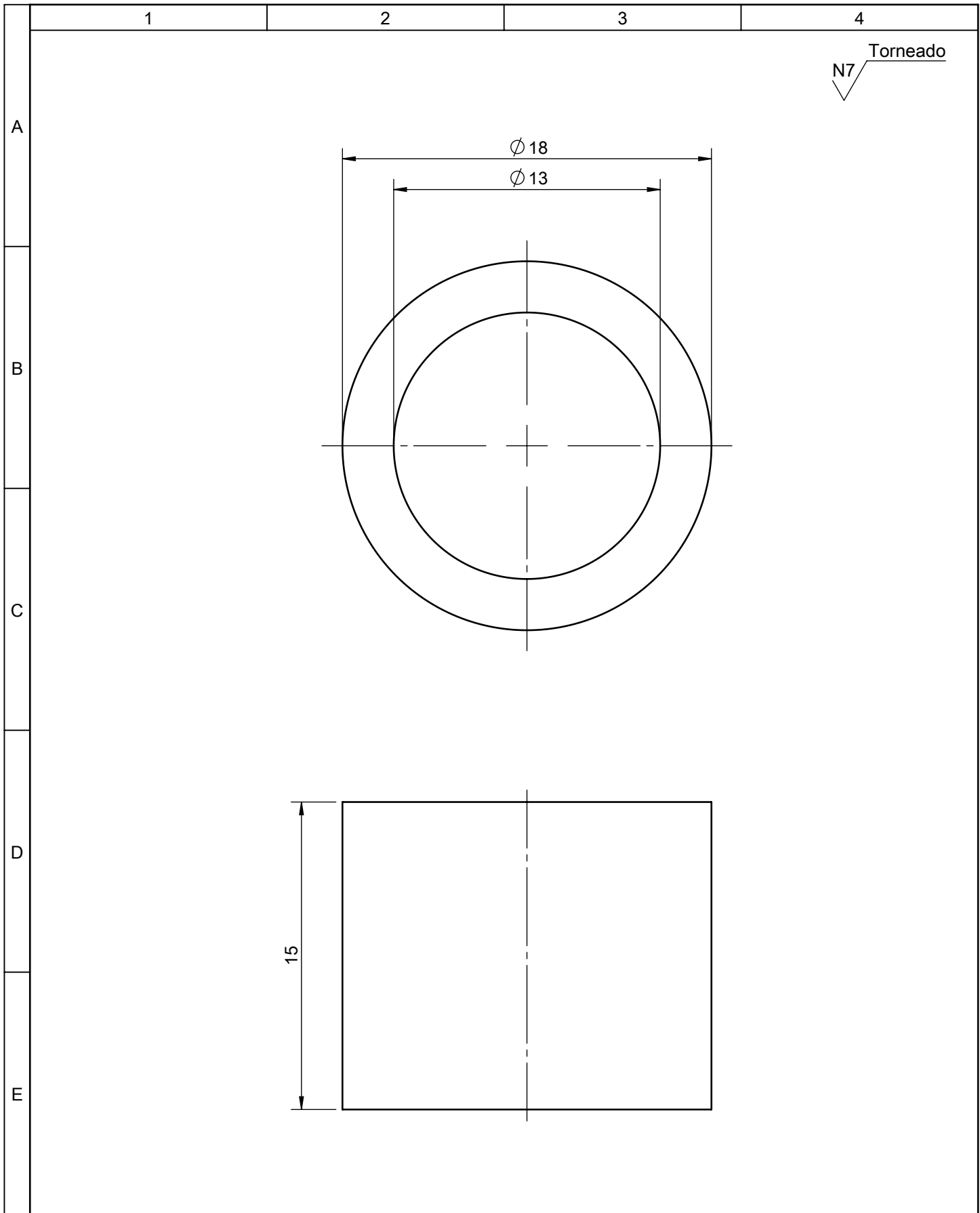
D

E

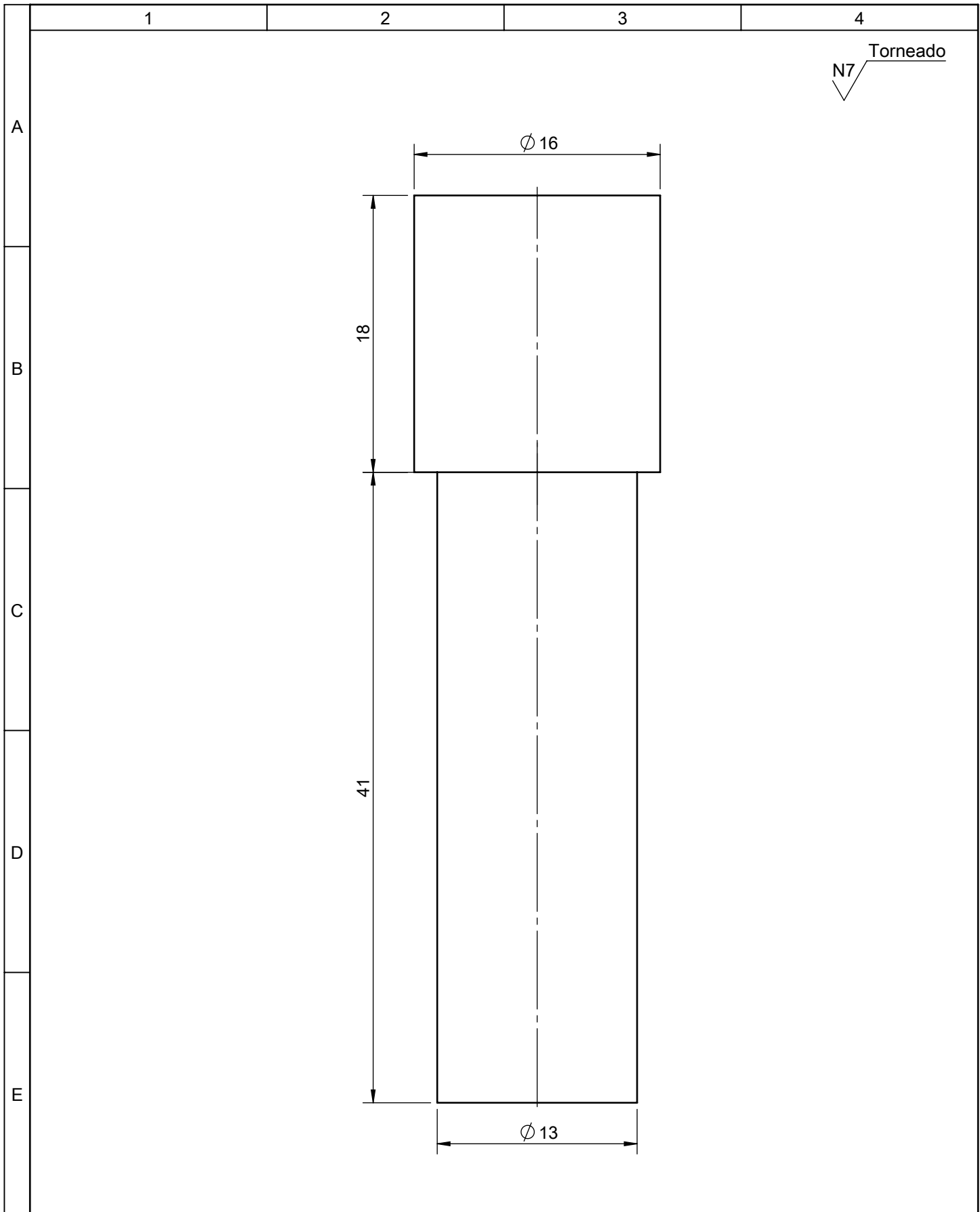
SECCIÓN A-A

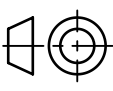


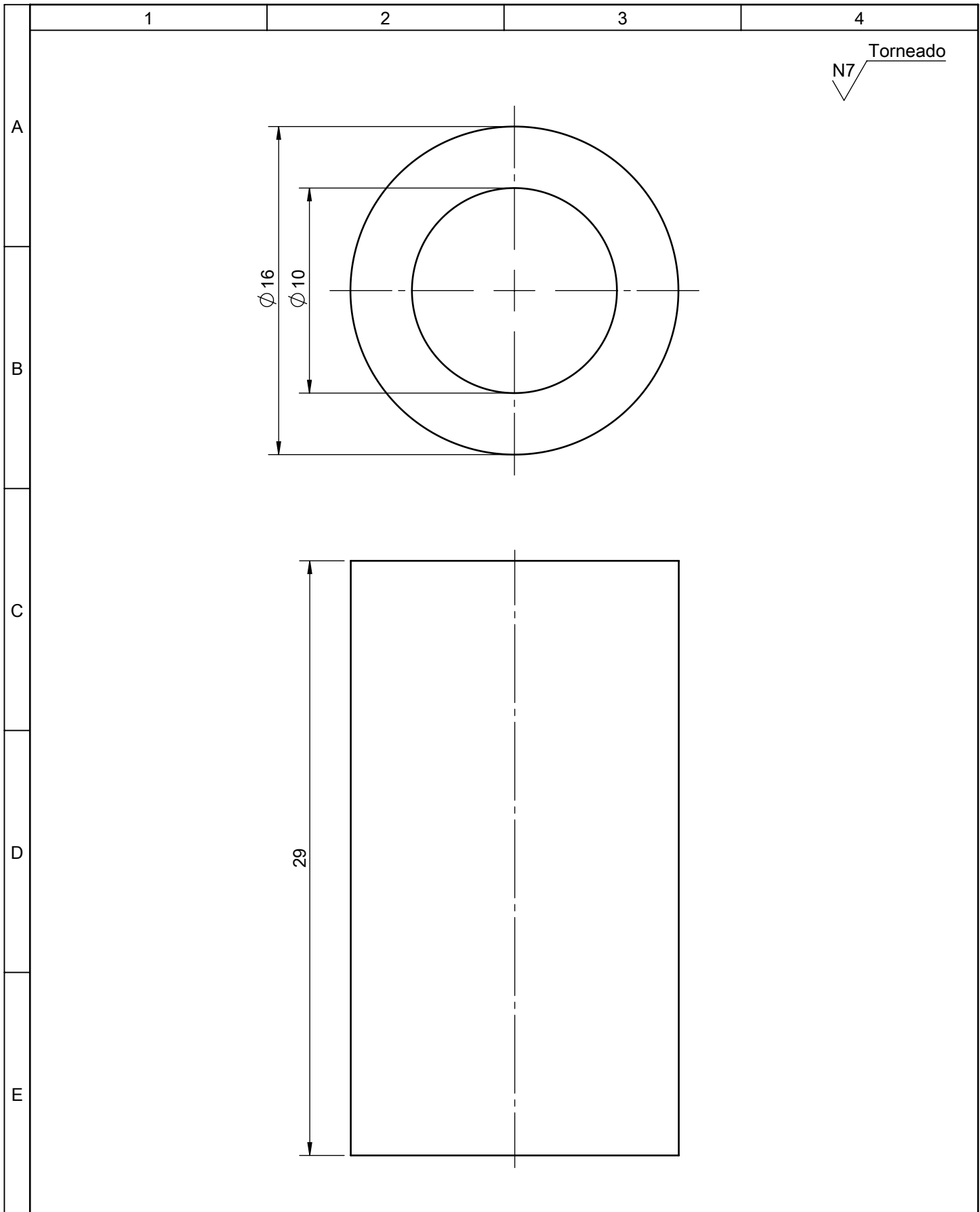
				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.5 mm	104.35 g	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.		
			Revisó:	12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	2:1
				UTA		Número del dibujo: 11	
				Ingeniería Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.5 mm	16.03 g	Bronce fosfórico	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.	BOCIN DE BRONCE DE LA BASE	4:1
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.		
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 12	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				± 0.3 mm	71.58 g	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.	EJE DE ROTACION DEL SEMIANILLO	3:1
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.		
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 13	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales: Acero AISI 1018			
				± 0.5 mm	3.55 g				
					Fecha	Nombre	Denominación: BOCIN MOVIL DELANTERO		Escala: 4:1
				Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.			
				Revisó:	12/01/23	Ing. López G.			
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	Número del dibujo: 14		
				UTA Ingeniería Mecánica					
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						

1

2

3

4

N7 Torneado

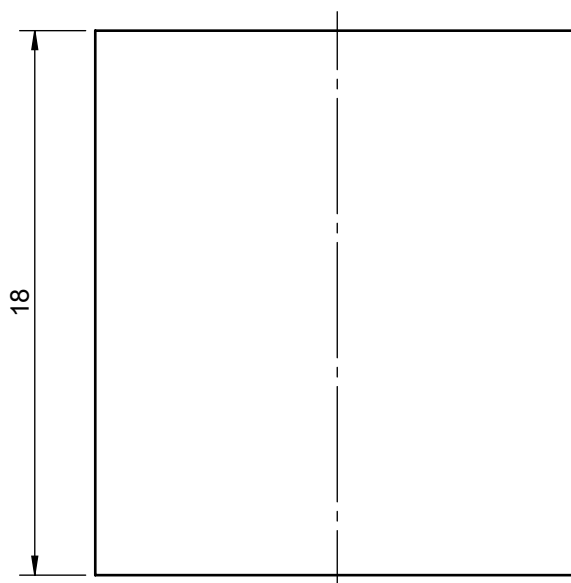
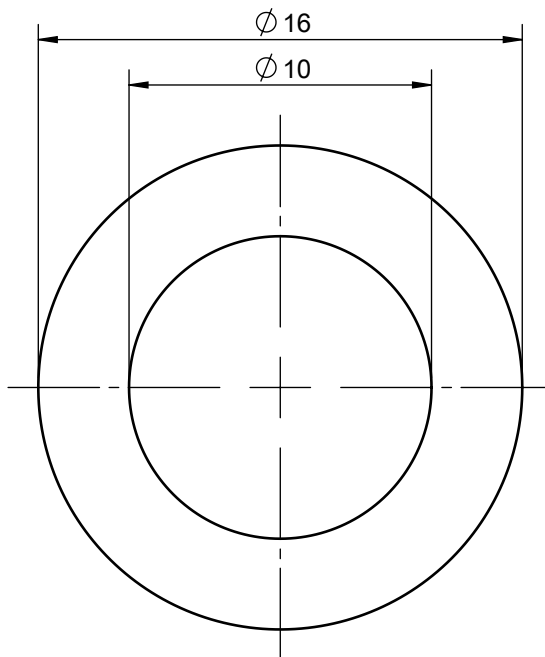
A

B

C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.5 mm	2.21 g	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.	BOCIN MOVIL POSTERIOR	4:1
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.		
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 15	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

1

2

3

4

N7 Torneado

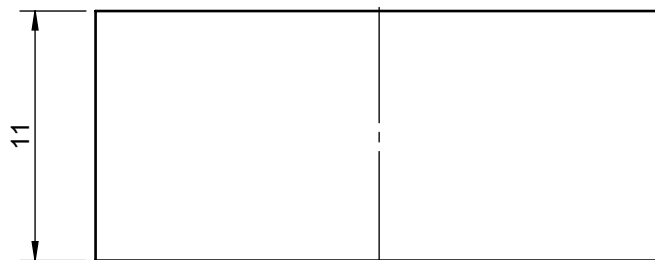
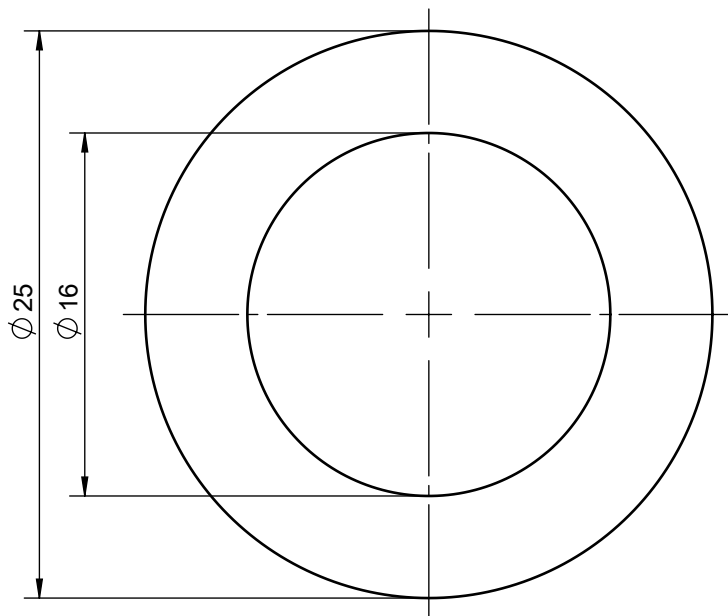
A

B

C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.5 mm	3.67 g	Nailon	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.		
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.	SEPARADOR	3:1
				UTA Ingeniería Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

1

2

3

4

N7 Torneado

A

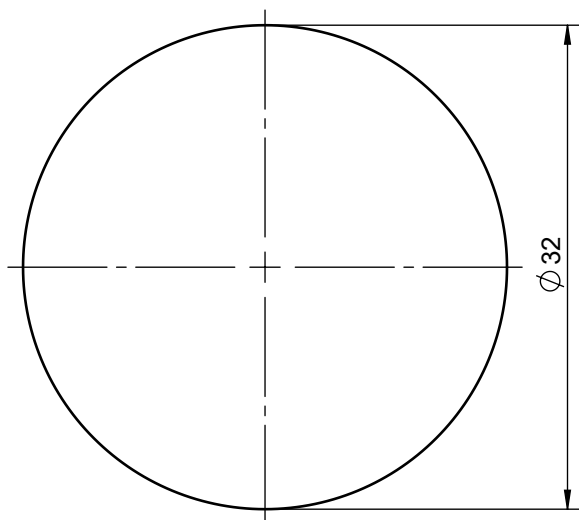
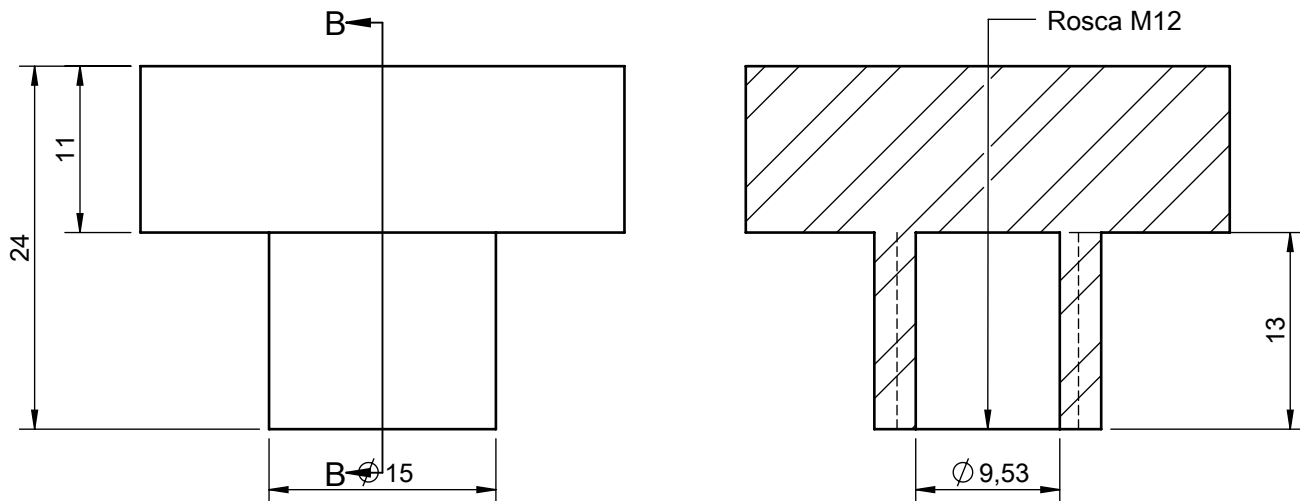
B

C

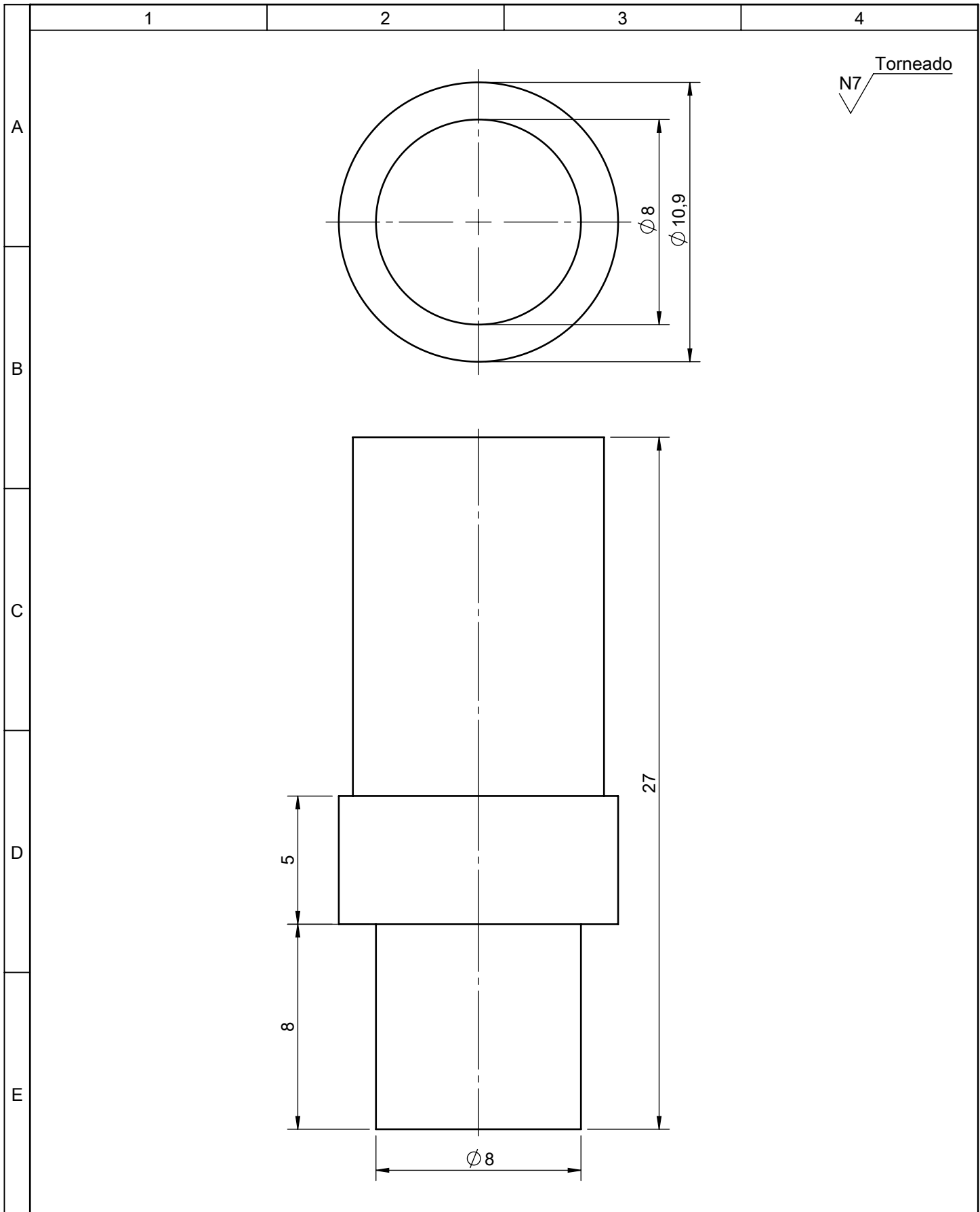
D

E

SECCIÓN B-B



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:			
				±0.5 mm	80.41 g	Acero AISI 1010			
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:		
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.				
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.				
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.	Número del dibujo: 18	2:1		
				UTA				(Sustitución)	
				Ingeniería Mecánica					
Edición	Modificación	Fecha	Nombre						



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				$\pm 0,3$ mm	15.21 g	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.		
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.	EJE ANILLO CARDAN	5:1
				UTA Ingeniería Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

1

2

3

4

N7 Torneado

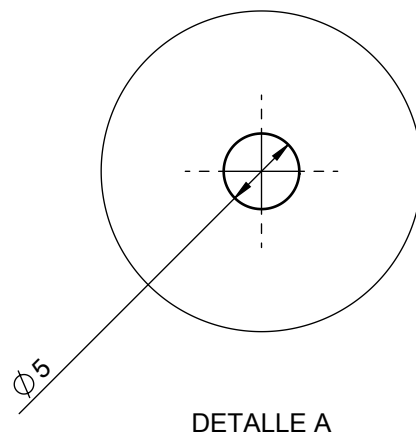
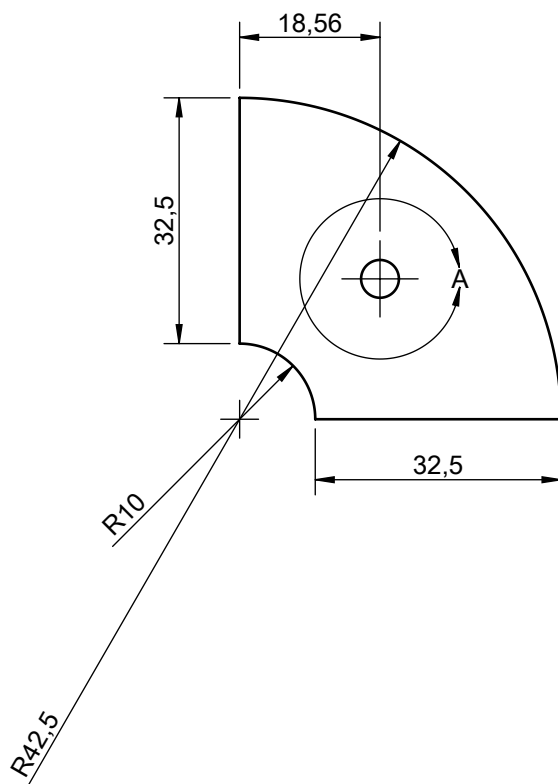
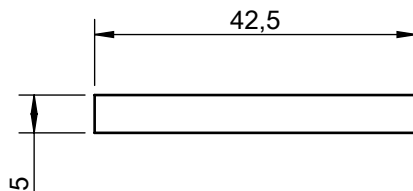
A

B

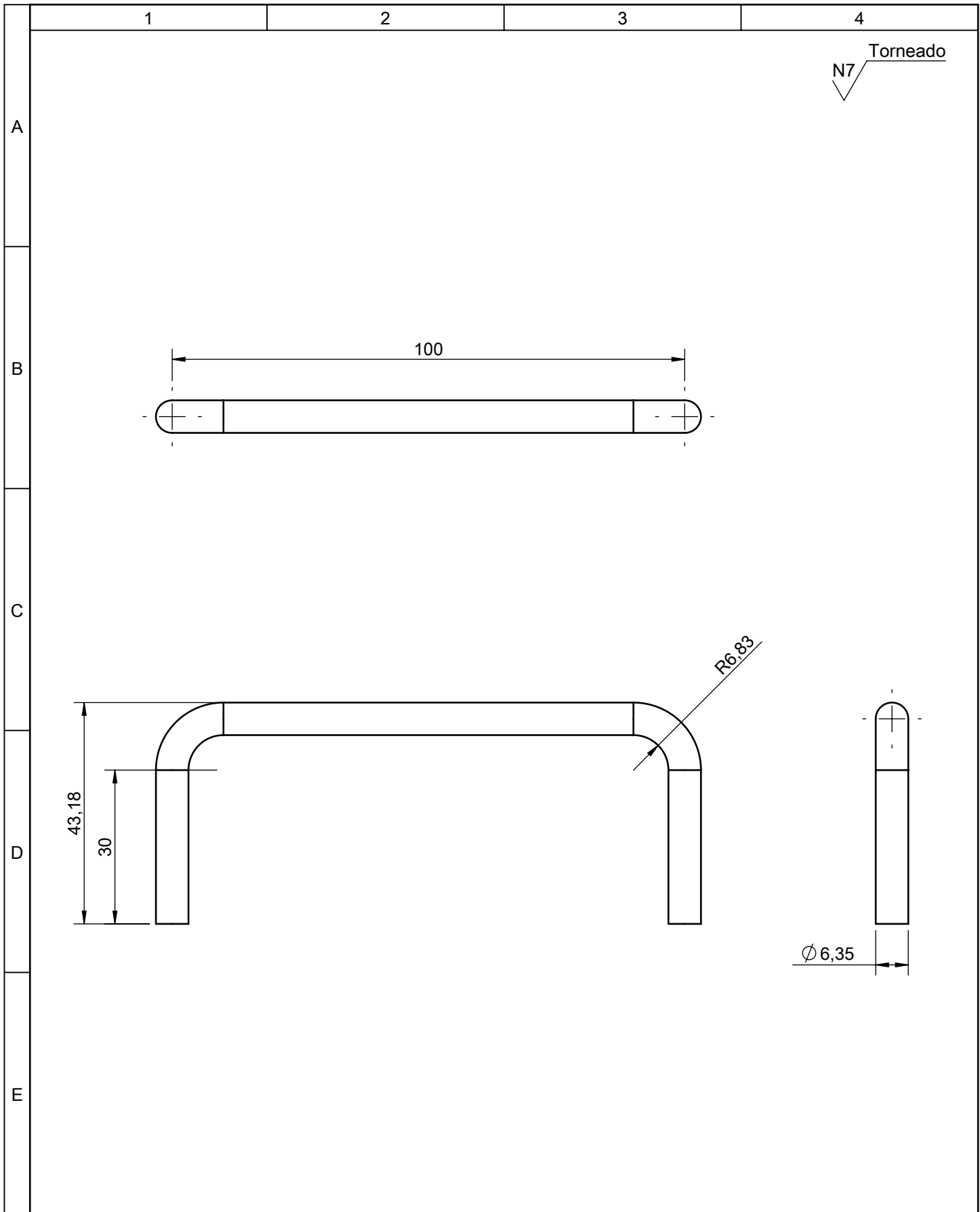
C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.3 mm	57.97 g	Bronce fosfórico	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 12/01/23	Ledesma O.		
				Revisó: 12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó: 12/01/23	Ing. López G.	MASA DEL ROTOR	1:1
				UTA Ingeniería Mecánica			
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0.3 mm	42.89 g	Acero AISI 1018	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
			Dibujó:	12/01/23	Ledesma O.		
			Revisó:	12/01/23	Ing. López G.		
				Aprobó:	12/01/23	Ing. López G.	1:1
				UTA Ingeniería Mecánica		Número del dibujo: 23	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	