

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y construcción de yugo para simulador de vuelo  
enfocado en entrenamiento de pilotos**

Trabajo de graduación presentado por Nicholas MacVean Gutierrez  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2024







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



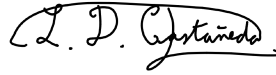
**Diseño y construcción de yugo para simulador de vuelo  
enfocado en entrenamiento de pilotos**

Trabajo de graduación presentado por Nicholas MacVean Gutierrez  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2024



Vo.Bo.:

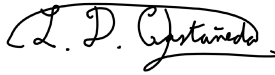


(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Luis Diego Castañeda Fernández

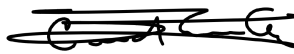
Tribunal Examinador:



(f) \_\_\_\_\_  
MBA Gustavo Adolfo Barrera Noriega



(f) \_\_\_\_\_  
Ing. Luis Diego Castañeda Fernández



(f) \_\_\_\_\_  
Ing. César Alberto Rosales Gómez

Fecha de aprobación: Guatemala, 05 de diciembre de 2024.



<b>Lista de figuras</b>	XI
<b>Lista de cuadros</b>	XIII
<b>Resumen</b>	XV
<b>Abstract</b>	XVII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Diseño y construcción de yugo . . . . .	3
2.2. Simuladores de vuelo en Guatemala . . . . .	3
2.3. Ejemplo del uso de tecnología para la conexión de yugo a la interfaz . . . . .	4
2.4. Retroalimentación de fuerza en los simuladores de vuelo . . . . .	5
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Marco teórico</b>	<b>11</b>
5.1. Yugo . . . . .	11
5.1.1. Dimensiones . . . . .	12
5.1.2. Grados de libertad . . . . .	12
5.1.3. Fuerzas experimentadas . . . . .	12
5.1.4. Materiales . . . . .	13
5.2. Control mecánico, hidromecánico y <i>fly by wire</i> . . . . .	13
5.3. Sensores de posición . . . . .	15
5.4. Sistema de retroalimentación de fuerza . . . . .	15
5.5. Simulador de vuelo . . . . .	15
5.6. Posicionamiento y alcance del piloto . . . . .	16

5.7. Impresión 3D	17
<b>6. Marco metodológico</b>	<b>19</b>
6.1. Descripción de la metodología	19
6.2. Definición de requisitos	20
6.3. Yugo	21
6.3.1. Geometría y material	21
6.3.2. Diseño preliminar (maquinado en aluminio)	23
6.3.3. Diseño final (impreso en 3D)	26
6.3.4. Validación de la precisión de cálculos en el software de análisis	28
6.3.5. Cálculos por medio de análisis estático estructural en el software de análisis	33
6.3.6. Impresión	41
6.4. Eje y chumaceras	41
6.4.1. Diseño del eje	43
6.5. Tope de eje y conexión de resortes	54
6.5.1. Diseño	54
6.5.2. Cálculos de conector central por medio de análisis estático estructural en software	56
6.6. Sistema de medición	60
6.6.1. Diseño de piezas	61
6.6.2. Posición de sensor de distancia	63
6.6.3. Impresión	63
6.7. Correderas	64
6.8. Resortes	65
6.8.1. Cálculo de constante elástica $k$	66
6.8.2. Cálculo de fuerza retroalimentada	67
6.9. Sujetadores de resortes	67
6.10. Estructura y material	68
6.10.1. Base primaria de pino	69
6.10.2. Base secundaria de pino	71
6.10.3. Soportes de pino para correderas	73
6.11. Uniones no permanentes	73
6.11.1. Esfuerzo de fatiga a tensión (unión atornillada entre yugo y eje)	73
6.11.2. Esfuerzo cortante directo (unión pernada entre correderas y madera)	76
6.11.3. Aplastamiento de madera por esfuerzo cortante (unión entre correderas y madera)	78
6.11.4. Aplastamiento de madera por esfuerzo de extracción (unión entre correderas y madera)	79
<b>7. Resultados</b>	<b>81</b>
7.1. Cumplimiento de requisitos	82
7.2. Sistema ensamblado	82
7.3. Simulaciones	83
7.4. Cálculos manuales	84
7.5. Movimiento del sistema	84
7.6. Resistencia del sistema	84
7.7. Costos	85

<b>8. Análisis de resultados</b>	<b>87</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>89</b>
<b>10.Recomendaciones</b>	<b>91</b>
<b>11.Bibliografía</b>	<b>93</b>
<b>12.Anexos</b>	<b>95</b>
12.1. Protocolo de pruebas y pruebas . . . . .	95
12.2. Manual de fabricación y ensamble . . . . .	97
12.3. Manual de uso . . . . .	97
12.4. Planos de construcción . . . . .	97



---

## Lista de figuras

---

1. Movimiento de la aeronave sobre sus ejes.	11
2. Yugo de aeronave.	12
3. Sistema mecánico de una aeronave.	13
4. Sistema hidromecánico de una aeronave.	14
5. Sistema <i>fly-by-wire</i> de una aeronave.	14
6. Longitudes recopiladas de movimientos humanos.	16
7. Alcance de movimiento de la mano.	17
8. Alcance de movimiento de la muñeca.	17
9. Primera iteración de yugo (vista isométrica frontal).	23
10. Primera iteración de yugo (vista isométrica posterior).	23
11. Segunda iteración de yugo (vista isométrica frontal).	24
12. Segunda iteración de yugo (vista isométrica posterior).	24
13. Tercera iteración de yugo (vista isométrica frontal).	25
14. Tercera iteración de yugo (vista isométrica posterior).	25
15. Espaciador de madera para tercera iteración de yugo (vista isométrica frontal).	26
16. Entrada de tornillo en cara frontal del yugo.	26
17. Entrada de eje en cara posterior del yugo.	27
18. Diseño final de yugo (vista isométrica frontal).	27
19. Diseño final de yugo (vista isométrica posterior).	28
20. Barra cilíndrica.	28
21. Diagrama de cuerpo libre de barra cilíndrica empotrada.	29
22. Mallado en barra cilíndrica.	30
23. Colocación de soporte fijo en barra cilíndrica.	30
24. Colocación de fuerza a tensión en barra cilíndrica.	31
25. Colocación de momento de giro en barra cilíndrica.	31
26. Esfuerzo equivalente de von Mises de 0.38575 MPa en barra cilíndrica.	32
27. Yugo simplificado (vista isométrica frontal).	33
28. Yugo simplificado (vista isométrica posterior).	34
29. Mallado en yugo.	34
30. Colocación de soporte fijo en yugo (jalado).	35
31. Colocación de fuerzas en yugo (jalado).	35

32. Deformación total máxima de 0.55346 mm en yugo (jalado).	36
33. Esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 0.63739 MPa en yugo (jalado).	36
34. Factor de seguridad mínimo de 15 en yugo (jalado).	36
35. Colocación de soporte fijo en yugo (empuje).	37
36. Colocación de fuerzas en yugo (empuje).	37
37. Deformación total máxima de 0.68624 mm en yugo (empuje).	38
38. Esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 0.82555 MPa en yugo (empuje).	38
39. Factor de seguridad mínimo de 15 en yugo (empuje).	38
40. Colocación de soporte fijo en yugo (giro).	39
41. Colocación de momento y fuerzas en yugo (giro).	39
42. Deformación total máxima de 0.26349 mm en yugo (giro).	40
43. Esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 0.36816 MPa en yugo (giro).	40
44. Factor de seguridad mínimo de 15 en yugo (giro).	40
45. Yugo impreso.	41
46. Rodamiento auto-alineable de bolas NTN UC204-012.	42
47. Carcasa NTN P203J.	42
48. Chumacera 3D.	42
49. Secciones de eje.	43
50. Radio de borde (r) de 1 mm en rodamiento NTN UC204-012.	43
51. Filetes de 1 mm en hombros de la segunda sección del eje.	44
52. Punto de encaje con el yugo en eje.	44
53. Diagrama de cuerpo libre de caso de esfuerzo mínimo en eje.	45
54. Diagrama de cuerpo libre de caso de esfuerzo máximo en eje.	45
55. Eje simplificado.	49
56. Mallado en eje.	49
57. Colocación de soporte fijo en eje.	50
58. Colocación de fuerzas en eje.	50
59. Factor de seguridad mínimo de 9.998 en eje.	51
60. Deformación máxima en eje de 0.016 mm en dirección al eje x.	51
61. Deformación máxima en eje de $1.037 \times 10^{-4}$ mm en dirección al eje y.	51
62. Eje maquinado con chumaceras.	54
63. Conector central.	55
64. Placas de contacto (vista isométrica superior).	55
65. Placas de contacto (vista isométrica inferior).	55
66. Funcionamiento de mecanismo de tope a $90^\circ$ .	56
67. Conector central simplificado.	57
68. Mallado en conector central.	57
69. Colocación de soporte fijo en conector central.	58
70. Colocación de fuerzas en conector central.	58
71. Factor de seguridad de 4.07 en conector central.	59
72. Conector central maquinado.	59
73. Placas de contacto maquinadas.	60
74. Sensor de distancia Sharp GP2Y0A21YK0F.	60
75. Potenciómetro de 10 kilo ohm con giro de $180^\circ$ .	60
76. Potenciómetro 3D.	61
77. Sensor de distancia 3D.	61
78. Base para potenciómetro.	62
79. Conector del eje a perilla del potenciómetro (vista isométrica frontal).	62

80. Conector del eje a perilla del potenciómetro (vista isométrica posterior).	62
81. Conector del eje a perilla del potenciómetro en posición de funcionamiento.	64
82. Potenciómetro colocado en su base.	64
83. Correderas.	65
84. Correderas diseñadas en software.	65
85. Resortes de tensión.	66
86. Resortes diseñados.	66
87. Sujetadores de resortes.	68
88. Sujetadores de resortes diseñados.	68
89. Base primaria.	69
90. Paredes laterales.	70
91. Pared posterior.	70
92. Base secundaria.	71
93. Diagrama de cuerpo libre de base secundaria.	71
94. Soportes de pino para correderas.	73
95. Unión atornillada entre el yugo y eje.	74
96. Conos en unión atornillada entre el yugo y eje.	75
97. Unión pernada entre correderas y soporte de madera en base primaria.	77
98. Unión pernada entre correderas y base secundaria de madera (con chumaceras y tope a 90° de giro).	79
99. Sistema de yugo para simulador de vuelo (vista superior).	82
100. Sistema de yugo para simulador de vuelo (vista isométrica frontal).	83
101. Giro hacia la derecha con fuerza de 49 N aplicada.	95
102. Giro hacia la izquierda con fuerza de 49 N aplicada.	96
103. Empuje con fuerza de 49 N aplicada.	96
104. Jalado con fuerza de 49 N aplicada.	97



---

Lista de cuadros

---

1. Identificación de códigos.	20
2. Requisitos.	21
3. Propiedades mecánicas del PETG con 50 % de relleno y patrón de impresión <i>grid</i> .	22
4. Propiedades mecánicas del PETG con 75 % de relleno y patrón de impresión <i>grid</i> .	22
5. Propiedades mecánicas del PETG con 100 % de relleno y patrón de impresión <i>grid</i> .	22
6. Propiedades mecánicas del PETG con 25 % de relleno y patrón <i>grid</i> .	23
7. Propiedades mecánicas del aluminio 6061.	29
8. Calidades de mallado según valor de <i>Skewness</i> .	30
9. Comparación de esfuerzo equivalente de von-Mises entre simulación y cálculo manual.	33
10. Selección de factores de carga axial $X$ e $Y$ .	53
11. Valores de constante $e$ para diámetros internos de 17 mm y 20 mm, ambos con diámetro externo de 47 mm.	53
12. Valores de carga axial $Y_2$ para diámetros internos de 17 mm y 20 mm, ambos con diámetro externo de 47 mm.	53
13. Verificación de cumplimiento de requisitos.	82
14. Factores de seguridad calculados en simulaciones estáticas estructurales.	83
15. Factores de seguridad calculados manualmente.	84
16. Cantidades de movimiento.	84
17. Resistencia del sistema durante los movimientos con una fuerza aplicada.	84
18. Costos de materiales.	85



Actualmente, los simuladores de vuelo son diseñados y construidos con materiales costosos, siguiendo procedimientos específicos y pasando por un periodo de certificación. Este trabajo tiene como objetivo diseñar y fabricar un sistema de yugo para un simulador de vuelo enfocado en el entrenamiento de pilotos, con un límite de presupuesto de Q1,500.00. El yugo, siendo un componente clave en el control de aeronaves, busca replicar las características físicas y de movimiento de un avión real, proporcionando una experiencia cercana a la operación de un timón de profundidad auténtico. Se especifican los requisitos de diseño basados en la funcionalidad de una cabina real, y se desarrollaron sistemas de movimiento y retroalimentación de fuerza para simular las condiciones de vuelo. Se emplean herramientas de diseño y simulación, como *ANSYS Workbench* y *Autodesk Inventor*, para optimizar la estructura y garantizar su rigidez y funcionamiento. Los materiales seleccionados son accesibles y de buena calidad, cumpliendo con los requerimientos de bajo costo sin sacrificar la durabilidad y el realismo. Se espera obtener un sistema de yugo que ofrezca una experiencia de pilotaje cercana a la realidad, soportando fuerzas mínimas de 49 N y contribuyendo al aprendizaje práctico de futuros pilotos en Guatemala.



Currently, flight simulators are designed and built with expensive materials, following specific procedures and undergoing a certification period. The aim of this work is to design and manufacture a yoke system for a flight simulator focused on pilot training, with a budget limit of Q1,500.00. The yoke, being a key component in aircraft control, seeks to replicate the physical and movement characteristics of a real airplane, providing an experience close to operating an authentic elevator control. The design requirements will be specified based on the functionality of a real cockpit, and motion and force feedback systems will be developed to simulate flight conditions. Design and simulation tools such as *ANSYS Workbench* and *Autodesk Inventor* will be used to optimize the structure and ensure its rigidity and performance. The selected materials will be affordable and of good quality, meeting the low-cost requirements without sacrificing durability and realism. The goal is to create a yoke system that offers a piloting experience close to reality, capable of withstanding minimum forces of 49 N, and contributing to the practical learning of future pilots in Guatemala.



La aviación es una de las industrias más tecnológicas y exigentes en términos de capacitación y formación de personal, especialmente cuando se trata del entrenamiento de pilotos. Un aspecto fundamental de este entrenamiento es la práctica en simuladores de vuelo, los cuales replican las condiciones de vuelo para que los pilotos desarrollen habilidades sin los riesgos asociados a la operación de aeronaves reales (Iberia, 2023). Sin embargo, en países como Guatemala, la cantidad de simuladores de vuelo disponibles es limitada, debido principalmente a los altos costos de adquisición de estos equipos. Por ejemplo, el simulador de vuelo Elite PI-135, tiene un precio aproximado de Q72,758.56, lo que lo vuelve inaccesible para la mayoría de las personas interesadas en la formación aeronáutica (AeroTraining, 2023).

Ante este contexto, surge la necesidad de desarrollar soluciones más accesibles que permitan una mayor difusión y uso de simuladores de vuelo en Guatemala. En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema de yugo para simulador de vuelo, enfocado en la formación de pilotos. El yugo es el componente principal de control, permitiendo manipular los movimientos longitudinales y laterales de la aeronave a través de los alerones y el timón de profundidad (US, 2018). Este proyecto busca crear una opción de bajo costo y funcional, utilizando tecnologías como la impresión 3D y componentes accesibles.

En el marco teórico de este proyecto, se aborda el funcionamiento del yugo en simuladores de vuelo, los materiales y tecnologías empleadas en su construcción, así como la integración de interfaces que permiten la comunicación entre el yugo y el software de simulación. Además, se explora la importancia de la retroalimentación de fuerza, una característica que mejora la experiencia de los usuarios al simular las sensaciones de vuelo reales (IrisDynamics, 2022).

Este trabajo se delimita a la construcción de un yugo funcional y accesible, con un enfoque en la reducción de costos y en el uso de tecnologías para la conexión y control de los movimientos del yugo. Así, se contribuye a la promoción de simuladores de vuelo más económicos en Guatemala, fomentando el desarrollo de pilotos capacitados y ofreciendo una alternativa viable para academias de aviación y entusiastas del vuelo.



## 2.1. Diseño y construcción de yugo

Un avión tiene controles de vuelo primarios y secundarios; los primarios proveen el control de la aeronave a través de sus ejes vertical, lateral y longitudinal. Por otro lado, los secundarios complementan a los primarios y modifican las características de control y el rendimiento (Iberia, 2023). Dado que el módulo individual trabajado es el diseño y construcción del yugo (timón de profundidad), es indispensable entender su función y lo que lo compone. El yugo controla el movimiento longitudinal alrededor del eje lateral o transversal. Está instalado en la parte posterior del estabilizador horizontal y conectado a la columna de mando para generar el movimiento hacia arriba o hacia abajo; su principal objetivo es mantener el avión nivelado. Al mover el timón hacia atrás, la nariz del avión se eleva, mientras que, si se mueve hacia adelante, la nariz del avión baja. Por esta razón, se le llama timón de profundidad (US, 2018). Además, está conectado a los alerones, los cuales están ubicados en el extremo posterior de las alas; estos controlan la aeronave en el eje longitudinal. Si el alerón izquierdo se mueve hacia abajo, el derecho lo hará hacia arriba y viceversa (Iberia, 2023).

## 2.2. Simuladores de vuelo en Guatemala

Hoy en día, la cantidad de simuladores de vuelo utilizados en Guatemala para instrucción de vuelo es escasa. El simulador de vuelo utilizado en una de las academias nacionales es el Elite PI-135, el cual está certificado y autorizado por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y la Federal Aviation Administration (FAA) (AeroTraining, 2023).

El simulador Elite PI-135 tiene un precio actual de \$9,295.00, o Q72,758.56. Según el fabricante, este es su sistema más reciente y asequible, incluyendo todos los componentes y programas necesarios para obtener una experiencia completa (Elite, 2023). En términos generales, este precio no es accesible para la mayoría de la población de Guatemala; el alto

costo probablemente proviene de la tecnología, materiales y equipo auxiliar utilizados. Por esta razón, es ideal proponer una opción más accesible para fomentar un mayor uso de simuladores en el país.

En 2019, la empresa Ciancoders de Guatemala fue contactada por la empresa SimAer para participar en el European Airlines Training Symposium (EATS). Dicho evento es uno de los más importantes mundialmente en cuanto a los entrenamientos de aerolíneas. El reto propuesto a Ciancoders fue desarrollar el software que se conectara al simulador real y mejorar la parte visual para el piloto, lo cual llevó aproximadamente seis meses para completarse. Junto a esto, se presentó una oportunidad de negocio, pues por cada venta del simulador, Ciancoders recibía regalías. A pesar de especializarse en simuladores, Ciancoders encontró un nicho en los seguros de vuelo, trabajando con una empresa española; especificaron que, al realizar una estadística, tuvieron un 300 por ciento de mayor rendimiento que un programador en España, demostrando que pudieron hacer un mejor trabajo en Guatemala sin la necesidad de migrar (PrensaLibre, 2019).

### 2.3. Ejemplo del uso de tecnología para la conexión de yugo a la interfaz

Una interfaz es la conexión entre dos equipos electrónicos o entre una persona y la computadora (Cambridge, 2023). Sabiendo que es, es evidente que todo simulador de vuelo necesita una, siendo esta la que conectará el yugo a todos los instrumentos y accesorios, permitiendo al usuario utilizarlo. Generalmente, las interfaces para simuladores vienen incluidas con la compra de estos, generando un costo adicional; de igual forma, estas interfaces son específicas a los componentes incluidos.

En una investigación realizada, Suárez desarrolla un programa interfaz HID (*Human Interface Device*) basado en Arduino para conectar controles de simulador de vuelo a computadoras. El fin de esto es comparar las diversas placas de Arduino, determinando cuál de las diferentes existentes proporcionaría los mejores resultados al desarrollar los prototipos. Esto proporciona una gran oportunidad, dado que se puede desarrollar una interfaz a un menor costo, teniendo la habilidad de modificarla y manipularla con mayor simplicidad en caso sea necesario o se modifiquen componentes. Una interfaz HID comunica la información por medio de un USB, permitiendo a los fabricantes crear dispositivos compatibles con USB e indica como el *driver* debe interceptar la información comunicada con el dispositivo (Suárez, 2022).

Lo realizado por Suárez en la investigación fue lo siguiente: investigar las placas Arduino disponibles en el mercado y sus capacidades para el estudio, recopilar información sobre el estándar HID, decidir que placa utilizar, determinar los controles que se deben implementar en la placa, estudiar el desarrollo del software Arduino, diseñar el software, diseñar el prototipo, adquirir los componentes para el prototipo, ensamblar el prototipo, pruebas del prototipo hasta obtener algo aceptable, estudiar y documentar la posible distribución del software. Luego de realizar el procedimiento previamente realizado, se concluyó que la placa Arduino Leonardo es la más apropiada para el estudio, teniendo esta una base sobre la que es fácil construir y cuenta con características que facilitarían el desarrollo. Al igual,

el desarrollo interno del código y los principios en los que se basa pueden ser fácilmente replicados y adaptados por el usuario dependiendo de sus necesidades; esto puede necesitarse al cambiar controles, lo cual es probable que ocurra en cada uno de los casos. El prototipo construido fue un éxito, pues el objetivo principal era servir como base para las pruebas del software desarrollado, pero terminó siendo diseñado y construido en paralelo al programa. Al momento de seleccionar los componentes, los criterios más grandes fueron la facilidad de adquirirlos y el precio, con tal de que fuera lo más accesible posible. La investigación fue exitosa, pues se cumplieron los objetivos y el desarrollo del software por medio de Arduino fue completado y funcional (Suárez, 2022).

## 2.4. Retroalimentación de fuerza en los simuladores de vuelo

Siendo utilizados para entrenamiento, los simuladores de vuelo deben proveer una experiencia realista, acercándose de mayor forma a lo que se sentiría pilotear una aeronave real. Esto incluye detalles como instrumentos, componentes físicos, componentes electrónicos, y la retroalimentación de fuerza (*force feedback*). Esta es la simulación del contacto físico del mundo real, por medio de la creación de resistencia o movimiento gracias a un mecanismo (IrisDynamics, 2022). Esto también es utilizado en la realidad virtual, o en otros simuladores, como lo son los simuladores de carreras.

En los simuladores de vuelo con retroalimentación de fuerza, se pueden utilizar resortes, servomotores o cilindros de aire para controlar la misma en el yugo. Por ejemplo, la empresa Proportion-Air, quienes crean estos productos, utilizan reguladores de presión de aire electrónicos para controlar la fuerza en tiempo real, dependiendo de que tan rígida se desea que sea la retroalimentación. De igual manera, utilizando un monitor analógico, se pueden obtener los datos del controlador, con el objetivo de obtener datos más precisos. (Proportion-Air, 2022)



El uso de simuladores de vuelo durante el aprendizaje de los futuros pilotos representa una herramienta que permite a estos realizar la primera etapa del proceso sin la necesidad de utilizar una aeronave. Esto significa un menor gasto, ya que no se debe pagar el costo del alquiler de la aeronave hasta llegar al punto de realizar las horas de vuelo prácticas. En Guatemala, el uso de los simuladores de vuelo con este enfoque es escaso, causado mayormente por el costo de estos. En el presente año, el salario mínimo en el país ronda los Q3,400.00 (MINTRAB, 2023), mientras que un simulador de vuelo con todos los componentes necesarios ronda los \$9,295.00, o Q72,758.56 (Elite, 2023). Por esto, existe la necesidad de brindar una alternativa económicamente factible y con el equipo adecuado, con tal de fomentar el uso de estos simuladores en el país.

En el 2022, el tamaño del mercado en Latinoamérica de simuladores de vuelo alcanzó un valor de aproximadamente 4.33 mil millones. Al igual, se estima que el mercado impulsará a una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) del 6.1 % en el periodo de 2023 a 2028 (EMR, 2022). Guatemala no forma parte considerable de estas estadísticas, pues no se ha registrado un incremento en el uso o mercado de los simuladores de vuelo en el país. Esto sugiere la necesidad de un sistema que contenga todos los componentes necesarios, contando con cercanía a lo que es pilotear una aeronave real y dando al futuro piloto la capacidad de demostrar sus habilidades. Esto se realizará por medio del uso de materiales correctos y de buena calidad para el buen desempeño y construcción de los componentes e instrumentos, sistema visual y componentes eléctricos funcionales, sistema de retroalimentación de fuerza (*force feedback*) y una interfaz constante de las características que un piloto pueda llegar a utilizar. Un simulador de vuelo profesional, tomando en cuenta todos los componentes, puede llegar a pesar hasta 330 libras (Sim2do, 2016). Siendo esto un peso sumamente alto, se pretende fabricar un simulador de vuelo con el menor posible, con tal de que este pueda ser transportado con facilidad. De igual forma, es de gran importancia que este pueda ser fácilmente ensamblado en su sitio de operación, contando con dimensiones adecuadas para que su ubicación pueda ser determinada fácilmente. Al ser esta una investigación trabajada en módulos, el correspondiente a este trabajo individual es el diseño y fabricación del yugo (timón de profundidad), el cual tendrá las características deseadas y funcionará

correctamente en conjunto con los demás componentes necesitados.

Como se expresó anteriormente, los simuladores de vuelo profesionales son de gran utilidad, y en Guatemala aún no existen propuestas de fabricación de estos a un precio accesible para entrenamiento. Por esto, se propone el diseño y fabricación de un simulador de vuelo accesible y profesional, y como investigación de módulo se propone el diseño y construcción de yugo para simulador de controladores de avión enfocado en uso recreacional o entrenamiento de futuros pilotos.

#### **4.1. Objetivo general**

Diseñar y construir un yugo para simulador de vuelo enfocado en entrenamiento de pilotos, sin sobrepasar un presupuesto de Q1,500.00.

#### **4.2. Objetivos específicos**

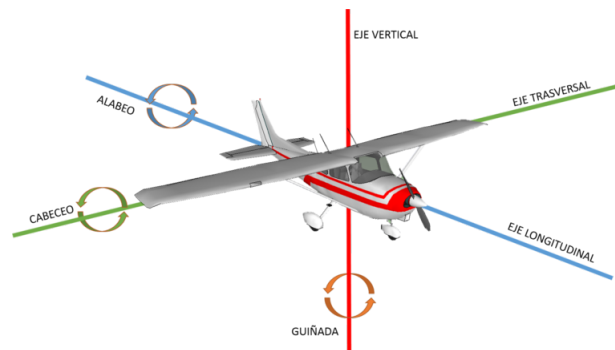
1. Especificar los requisitos de diseño de un yugo para un simulador de vuelo.
2. Diseñar el sistema de movimiento y el sistema de retroalimentación de fuerza del yugo.
3. Crear el manual de fabricación, ensamble y uso del yugo para un simulador de vuelo.



## 5.1. Yugo

El yugo se encarga de controlar el movimiento de los alerones y elevadores de la aeronave. De esta forma, el piloto puede controlar los movimientos conocidos como “cabeceo” y “alabeo” al conllevar el vuelo, como se observa en la Figura 1 (Fulgencio, 2018). El yugo puede moverse hacia adelante o hacia atrás un máximo de 16 cm, para accionar los elevadores (cabeceo), y puede ser rotado 90° en ambas direcciones para accionar los alerones (alabeo). En la Figura 2 se puede observar como es la geometría de este. (A. Essameldin, 2023) (Twombly, 2019)

Figura 1: Movimiento de la aeronave sobre sus ejes.



Fuente: (Fulgencio, 2018)

Figura 2: Yugo de aeronave.



Fuente: (Twombly, 2019)

### 5.1.1. Dimensiones

El tamaño y diseño de los yugos varía dependiendo del modelo de la aeronave. Siendo el dispositivo de vuelo sintético enfocado en el entrenamiento de futuros pilotos, se utilizarán dimensiones similares a las del yugo de un Cessna 172, la cual es la aeronave de entrenamiento más utilizada a nivel mundial (EFA, 2019). Las dimensiones de este modelo de yugo, en escala 1:1, son 300 x 150 x 50 mm (Cockpitturk, 2023).

### 5.1.2. Grados de libertad

El diseño del yugo varía dependiendo de la aeronave en la que se utilice. Cada diseño está conformado por distintas longitudes, componentes y materiales. En términos generales, un yugo debe entregar por lo menos dos grados de libertad de manera correcta (A. Essameldin, 2023).

Los dos grados de libertad deben cumplir con un movimiento lineal y giratorio. En estos casos, la conversión de movimiento lineal a rotación es crucial, para lo cual se pueden utilizar diversas clases de rodamientos. Este tipo de mecanismos pueden llegar a ser pesados, complejos y sujetos a diversos mantenimientos. Por esto, deben estar conformados por materiales de buena calidad, ligeros y resistentes (M. Mori, 2013).

### 5.1.3. Fuerzas experimentadas

Se sabe que a mayor velocidad de vuelo, el aire creará una mayor resistencia en la aeronave. Esto significa que se tendrá una mayor resistencia en el movimiento de los alerones y elevadores, creando en consecuencia una mayor fuerza en contra del movimiento del yugo. En un Cessna 172 (o cualquier otra aeronave CS-23), y en aplicaciones prolongadas, el piloto aplicará 44.5 N para jalar y empujar el yugo (correspondiendo esto al cabeceo de la aeronave). Por otro lado, en términos del alabeo, se ejercerían 22 N al girarlo (European Aviation Safety Agency, 2003). Esto indica que la estructura del mismo debe ser diseñada y construida con un material que resista más de 44.5 N.

Se debe tomar en cuenta que, al estar en vuelo, el peso de las manos del piloto estará actuando sobre el yugo. Esto puede ser al momento de realizar los movimientos, o cuando estas solamente estén apoyadas en el mismo. Por esto, se debe considerar el peso promedio de ambas manos y antebrazos: 1.4 kg y 3.2 kg, respectivamente (Ideal, 2016). Se incluye el peso de los antebrazos, ya que estos están suspendidos y generan un peso adicional.

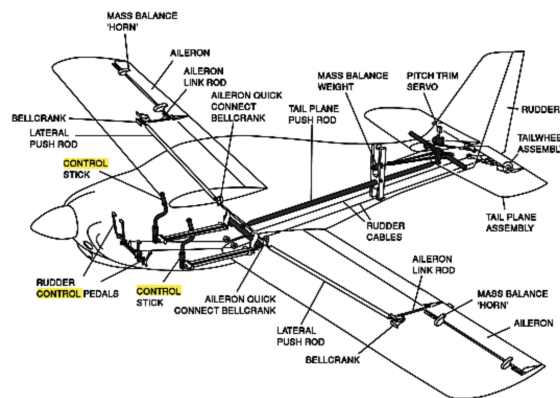
#### 5.1.4. Materiales

Los materiales utilizados para la fabricación de yugos en aeronaves reales varían dependiendo del tipo de aeronave y las fuerzas a las que estará sometido el componente. Una empresa dedicada a la fabricación de componentes para aeronaves desde 1951, indica que los materiales más comunes para la fabricación de yugos son el acero inoxidable, aluminio, latón, cobre, titanio y plásticos. (CMP, 2020).

## 5.2. Control mecánico, hidromecánico y *fly by wire*

Actualmente, la mayoría de los sistemas de control de las aeronaves modernas son controlados por lo que es conocido como *fly-by-wire*, dado a los avances tecnológicos en los últimos años. Previo a esto, eran controlados mecánicamente o hidromecánicamente. En cuanto al sistema mecánico, todos los dispositivos de control, como el yugo, están directamente conectados a las superficies de control de la aeronave por medio de cables, poleas, varillas y palancas. Por esto, este sistema es el más exigente en cuanto a fuerza del piloto, ya que no se tiene ninguna asistencia para disminuir la resistencia. Una ventaja del mismo es que no requiere mantenimiento frecuente, y el mismo es sencillo (A. Garg, 2013).

Figura 3: Sistema mecánico de una aeronave.

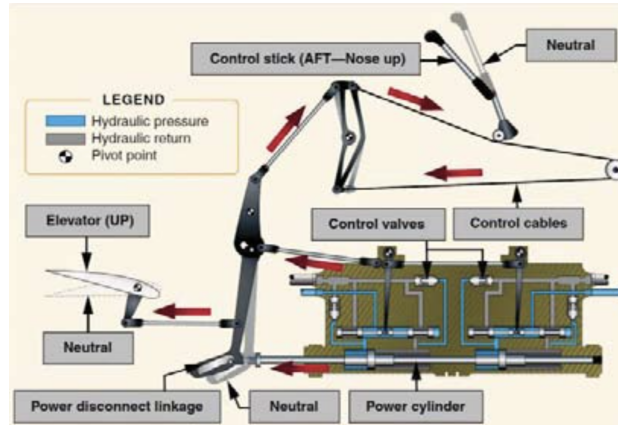


Fuente: (A. Garg, 2013)

En cuanto al sistema de control hidromecánico, este cuenta con fuerza hidráulica, la cual con una gran cantidad de rigidez, es ideal para las aeronaves que vuelan a velocidades más altas. Se cuenta con un circuito mecánico, el cual es el mismo que el descrito anteriormente.

Este trabaja en conjunto con un circuito hidráulico, el cual se activa cuando el piloto mueve alguno de los controles, abriendo la válvula del circuito (A. Garg, 2013).

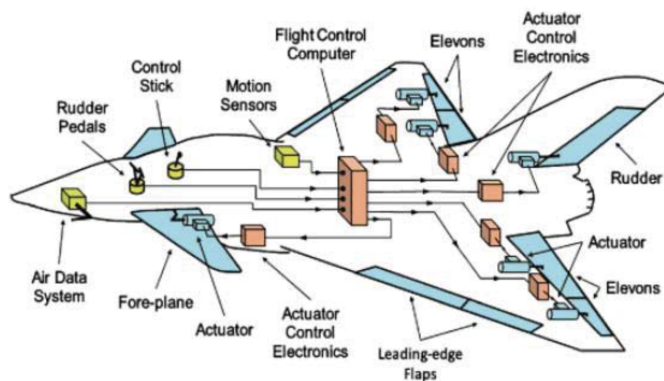
Figura 4: Sistema hidromecánico de una aeronave.



Fuente: (A. Garg, 2013)

Por último, el sistema de control fly-by-wire tiene la característica que todos los movimientos de los controles son convertidos a señales electrónicas, las cuales luego son enviadas a computadoras por medio de cables. Dichas computadoras se encargan de determinar el movimiento de los accionadores en los controles de superficie, creando también señales automáticas para realizar movimientos sin la interacción del piloto. Estas señales permiten funciones como el piloto automático o la estabilización automática de la aeronave. A comparación de los otros sistemas de control, este es más liviano y su mantenimiento es más sencillo (A. Garg, 2013).

Figura 5: Sistema fly-by-wire de una aeronave.



Fuente: (A. Garg, 2013)

### 5.3. Sensores de posición

Al estar en una simulación de vuelo, se necesita comunicar a la interfaz los movimientos realizados en el yugo, con tal de que estos sean proyectados en la imagen de la simulación. Esto puede ser realizado por sensores de posición, los cuales se encargan de determinar la posición y desplazamiento en base al punto inicial. De igual forma, son necesarios ya que el desplazamiento del yugo depende también de la velocidad de vuelo de la aeronave (D. Wu, 2009). Existen distintos tipos de sensores de posición, tales como los lineales infrarrojos, giratorios (potenciómetros), angulares, absolutos, graduales, de contacto y sin contacto (SpectraSymbol, 2023). En el caso de esta investigación, los tipos de sensores más convenientes son el lineal infrarrojo y giratorio, con tal de detectar el desplazamiento lineal y giro. Estos parámetros luego son registrados y convertidos en señales de salida que pueden procesarse, dependiendo de los requerimientos de la interfaz (Variohm, 2019).

### 5.4. Sistema de retroalimentación de fuerza

El sistema de retroalimentación de fuerza está basado en componentes mecánicos que tienen como objetivo, como bien lo dice su nombre, generar fuerza en el yugo para tener una experiencia más realista en la simulación. Los sensores de fuerza son utilizados para medir la fuerza real que los servos del mecanismo ejercen, para registrarla y compararla con las fuerzas de referencia. Los servomotores tienen la capacidad de determinar la fuerza de referencia, para que esta luego sea realimentada al piloto. Esto es posible con la combinación de la interfaz y los sensores, creando un proceso de lazo cerrado que es controlado en una computadora. De igual forma, es común utilizar resortes de tensión y compresión en los sistemas, generando estos la fuerza retroalimentada al realizar los movimientos. (D. Wu, 2009)

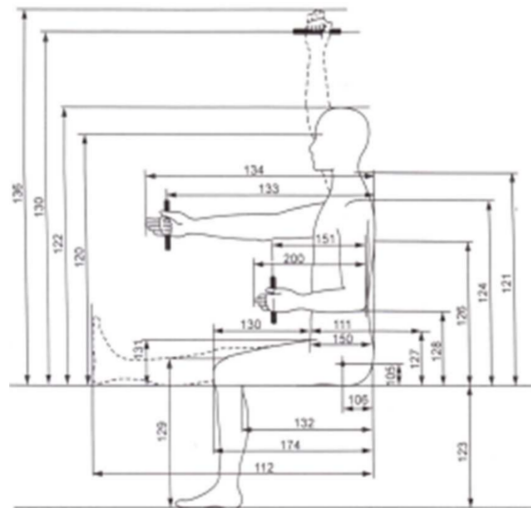
### 5.5. Simulador de vuelo

Al escuchar “simulador de vuelo”, la primera idea que suele venir a la mente son los simuladores comerciales que se pueden adquirir en páginas de internet. Estos simuladores, por lo general, incluyen solo el yugo, el cual debe ser utilizado con algún programa de simulación ya existente. Un simulador de vuelo busca replicar lo que contiene la cabina de una aeronave, la cual debe ser específica para incluir el equipo electrónico, mecánico y los programas, tal como los tiene un avión real. Este debe realizar la simulación tanto en vuelo como en tierra, contando con un sistema de retroalimentación de fuerza para generar los estímulos que se obtendrían en un vuelo real. Dichos estímulos deben ser equivalentes a los que se experimentan al utilizar un sistema visual que despliega una vista de campo horizontal y un cambio de visión vertical. Ambas vistas deben funcionar simultáneamente a lo largo de la simulación (DGAC, 2022).

## 5.6. Posicionamiento y alcance del piloto

En las cabinas de mando de una aeronave, es de suma importancia tomar en cuenta la posición del asiento del piloto para garantizar un alcance ergonómico a todos los componentes de mando. El análisis de esto comienza desde el diseño de la cabina en sí, tomando en cuenta factores como: la forma del espacio, los límites del lugar de operación y el espaciamiento del mismo, la geometría y posicionamiento de la silla, las zonas de observación visual dentro de la cabina, y los principios de operación y posicionamiento de los instrumentos y controles de mando. En cuanto a la ergonomía del diseño de la cabina, se deben tomar en cuenta las dimensiones de una persona, posicionando los instrumentos y controladores de una manera en la que sean legibles o fáciles de operar. Es importante adaptar el espacio y posicionamiento al piloto, por lo que se deben tomar en cuenta aspectos como los tipos de movimientos realizados, el alcance del trabajo y la complejidad del mismo, la posición del cuerpo en la posición de trabajo (sentado), el grado de restricción de movilidad para los movimientos requeridos, la posibilidad del ajuste de los diferentes componentes del asiento, entre otros. Para el diseño de las cabinas, se utilizan bases de datos que contienen valores calculados para 90 por ciento de la población, con tal de hacer diagnósticos y diseños adecuados. En términos del yugo, se debe tomar en cuenta el alcance de las manos, la altura del hombro, el ancho del hombro, ancho del codo y la longitud del asiento (Adamski, 2020).

Figura 6: Longitudes recopiladas de movimientos humanos.

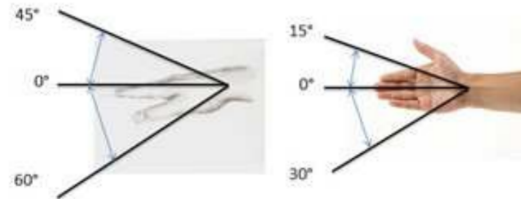


Fuente: (Adamski, 2020)

Al estar sentado y con los cinturones de seguridad puestos, el piloto tiene restricción de movimiento en el torso, contando mayormente con el movimiento de sus extremidades. De aquí surgen tres tipos de alcances de manos, siendo estos el normal, máximo y forzado. El alcance normal se define como el rango alcanzado determinado por la posición de la media de la palma de la mano cuando se rota la muñeca relativamente al codo. El alcance máximo se define cuando el cuerpo está sin movimiento, al determinar la posición posterior de la mitad de la mano al moverla completamente, estando recta en la articulación del codo. Por último, el alcance forzado se define por el movimiento del máximo alcance, el

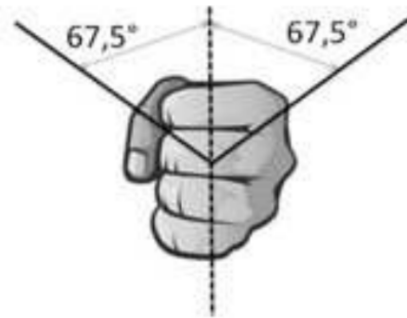
cual incluye un porcentaje de movimiento del torso. Siendo la parte del cuerpo con la que se opera el yugo, la mano, es importante saber que esta puede ser movida  $45^{\circ}$  arriba y  $60^{\circ}$  abajo horizontalmente, cuando está posicionada de manera horizontal. Al posicionarse verticalmente, puede desviarse  $15^{\circ}$  arriba y  $30^{\circ}$  abajo horizontalmente (Adamski, 2020).

Figura 7: Alcance de movimiento de la mano.



Fuente: (Adamski, 2020)

Figura 8: Alcance de movimiento de la muñeca.



Fuente: (Adamski, 2020)

## 5.7. Impresión 3D

En su trabajo de graduación, Oliva (2022) indica que la impresión 3D es de gran utilidad para la manufactura de objetos o piezas, siendo una técnica versátil, limpia en el área de trabajo y fácil de utilizar. Esta consta de tres componentes principales: la placa de impresión, que es la base sobre la cual se imprime la pieza. A continuación, la bobina de filamento, que contiene el material con el que se realizará la impresión. Por último, la cabeza de extrusión, la cual se calienta a una temperatura determinada para fundir el filamento. Al trabajar estas partes en conjunto, el filamento fundido se deposita en la placa de impresión, creando diversas capas hasta llegar a la geometría deseada. Además, se menciona que los termoplásticos utilizados para imprimir son mecánicamente estables, tienen buenas propiedades y ofrecen la posibilidad de sustituir otros métodos de manufactura que son más complejos. Entre los aspectos más importantes se encuentran la selección de la impresora y el porcentaje de relleno, los cuales definen el resultado de la pieza final. El porcentaje de relleno indica la estructura interna de la pieza, por lo que, mientras mayor sea este, se necesitará más material y tiempo. En la mayoría de los casos se utiliza un 20 por ciento; sin embargo, este puede incrementarse dependiendo de la rigidez que se requiera. Los patrones de relleno son generados por medio

de códigos que luego se ingresan a la impresora, encargándose de reemplazar el relleno sólido de la pieza por geometrías más sencillas. Existiendo diversos tipos, los más comunes son el rectangular, triangular y *honeycomb*. El primero cuenta con una buena resistencia en todas las direcciones y un tiempo de impresión corto. En el caso del triangular, brinda una gran resistencia en la dirección de las paredes, mientras que el *honeycomb* se usa para generar fuerza en la pieza y resistencia en la totalidad de sus direcciones. Entre los materiales comúnmente utilizados para la impresión 3D se encuentran el PLA, PETG y ABS, cada uno con propiedades mecánicas distintas. La temperatura del extrusor debe variar dependiendo del material que se esté utilizando, asegurando que el filamento se funda correctamente. Si esto no se toma en cuenta, la pieza tendrá imperfecciones, como burbujas de aire (Oliva, 2022). Se recomienda realizar las impresiones con porcentajes de relleno entre el 15% y el 50%, proporcionando una resistencia uniforme a lo largo de la pieza, con un refuerzo general, sin agregar peso o tiempo de impresión significativos (Boissonneault, 2024).

## 6.1. Descripción de la metodología

Siendo el principal objetivo diseñar y construir el yugo para un simulador de vuelo enfocado en entrenamiento de pilotos, se siguió un procedimiento dividido en fases.

Durante la primera, siendo esta la generación de ideas, se investigaron diseños existentes de yugos en aeronaves, siendo estos elementos esenciales en las mismas. El diseño a replicar fue el yugo de una aeronave Cessna 172, siendo esta la preferida para el entrenamiento de vuelo. De igual manera, se seleccionaron posibles materiales a utilizar, tomando en cuenta la disponibilidad de los mismos en la región.

En la segunda fase, se diseñó el yugo y sistema de retroalimentación de fuerza por medio del software *Autodesk Inventor*. En el caso del primero, se realizaron iteraciones hasta alcanzar una geometría lo más cercana posible a la realidad. Dentro de esto, se tomó en cuenta la calidad del diseño, materiales, los esfuerzos generados por los diferentes movimientos y el factor de seguridad. Los últimos dos mencionados fueron obtenidos por medio de simulaciones realizadas en el software *ANSYS Workbench*, las cuales facilitaron la realización de los cálculos, siendo compleja la geometría a analizar. Para el sistema de retroalimentación de fuerza, se llevó a cabo la creación de un eje, su mecanismo de tope y la incorporación de cojinetes en el mismo. Además, se aplicó el uso de resortes para retroalimentar la fuerza requerida, diseñando también el sistema de sujeción y decidiendo la ubicación de estos. El movimiento del sistema se logró mediante correderas prefabricadas, las cuales permitieron el desplazamiento tanto de empuje como de jalado. En cuanto a las bases, se definió el material y tamaño adecuados para soportar todos los componentes del sistema. De igual forma, se diseñaron las diferentes uniones no permanentes en el módulo, utilizando pernos, tornillos y tuercas. Por último, se definió la posición de los componentes de medición (potenciometro y sensor de distancia) y se diseñaron las piezas de sujeción de los mismos. Se realizaron cálculos

en los componentes correspondientes para garantizar su resistencia suficiente a los esfuerzos aplicados, con un factor de seguridad mayor al requerido. Algunos cálculos se realizaron mediante simulaciones, mientras que otros se hicieron manualmente. En algunos casos, los cálculos manuales fueron validados mediante simulaciones. Es importante destacar que a lo largo del marco metodológico se incluyeron medidas generales de cada pieza o componente diseñado. No obstante, los planos completos de estos se encuentran en el capítulo de anexos.

En la tercera fase, se realizó el prototipado, protocolo de pruebas y las pruebas en sí. Tras obtener las herramientas, materiales y accesorios necesarios, se construyó cada uno de los componentes. Al tener estos, se ensambló el primer prototipo del yugo; este fue inspeccionado detenidamente para corroborar que su funcionamiento físico fuera adecuado y que no existiera un error evidente de diseño. Luego, se realizó el protocolo de pruebas, el cual incluyó los procedimientos realizados, instrumentos utilizados y medidas de seguridad implementadas al realizar las pruebas para comprobar formalmente el funcionamiento del yugo y sus componentes. A este punto, siendo un trabajo de diversos módulos, se tuvo que comenzar a trabajar y realizar pruebas con los componentes fabricados por los otros integrantes. La compatibilidad del yugo con los demás componentes podría ser una fuente potencial de complicaciones, ya que no se anticipaba que todos los componentes funcionaran correctamente juntos durante la primera prueba. Por esto, utilizando el protocolo y realizando las respectivas pruebas, se obtuvo la información necesaria para mejoras generales.

## 6.2. Definición de requisitos

Cuadro 1: Identificación de códigos.

Código	Requisito
DI	Diseño
SE	Seguridad
FF	Sistema de retroalimentación de fuerza
SM	Sistema de medición
PR	Pruebas

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2: Requisitos.

Código	Requisito
DI01	Las dimensiones del yugo no deben tener una diferencia mayor al 15 % respecto a las del utilizado en un Cessna 172.
DI02	El yugo, junto con todos sus componentes, no debe superar un peso de 30 lb.
DI03	El yugo y sus componentes deben poder ensamblarse en menos de 1 hora.
DI04	El movimiento de empuje y jalado debe ser logrado mediante el uso de correderas.
DI05	El sistema debe contar con chumaceras para proporcionar el movimiento de giro.
FF01	La fuerza retroalimentada en los movimientos de empuje, jalado y giro debe ser generada por dos resortes de tensión.
SE01	El yugo y los componentes pertinentes deben tener un factor de seguridad superior a 1.5.
SE02	El yugo y sus componentes no deben tener bordes afilados ni superficies punzantes.
SM01	El ángulo de giro debe medirse mediante un potenciómetro.
SM02	El desplazamiento de empuje y jalado debe medirse mediante un sensor de distancia.
PR01	Para validar el diseño, se deben realizar pruebas con todos los demás módulos del simulador de vuelo

Fuente: Elaboración propia

## 6.3. Yugo

### 6.3.1. Geometría y material

Dado que el yugo es un componente diseñado con realismo, se decidió aproximar su geometría lo más posible a la del utilizado en una aeronave Cessna 172: 300 mm de base, 150 mm de altura y 50 mm de profundidad (Cockpitturk, 2023). Inicialmente, se consideró el uso de aluminio 6061 para la fabricación del yugo, brindando resistencia óptima, menor peso que el acero y un acabado deseable de alta calidad. Sin embargo, tras varias iteraciones de diseño, se observó que el maquinado para alcanzar la geometría deseada resultaba ser un proceso complejo y largo. Por lo tanto, se buscó una alternativa más eficiente que mantuviera las mismas características requeridas. Se llegó a la conclusión de que la impresión 3D era la mejor opción, y se determinó que el material más adecuado para este caso era el PETG, ofreciendo resistencia suficiente, un acabado final de buena calidad y un tiempo de diseño e impresión considerablemente menor que el requerido para el maquinado del aluminio.

En su trabajo de graduación, Oliva (2022) realizó ensayos en probetas impresas con los materiales comúnmente utilizados en la impresión 3D: PLA, PETG y ABS. El objetivo era determinar las propiedades mecánicas de cada material, considerando el porcentaje de relleno y el patrón de impresión (*grid*, *zigzag* o *lines*). Los porcentajes de relleno evaluados

para cada patrón fueron 50 %, 75 % y 100 %.

En el caso del yugo, se optó por imprimirlo con PETG a un 25 % de relleno, utilizando el patrón *grid*. Esta elección se hizo para reducir el tiempo de impresión y garantizar resistencia en todas las direcciones, capaz de soportar los esfuerzos aplicados a la pieza. En este trabajo, las propiedades mecánicas de interés fueron el módulo de Young, la resistencia a la fluencia y la resistencia última a la tensión. Oliva (2022) realizó cinco ensayos para cada porcentaje de relleno, utilizando el patrón establecido. Esto permitió obtener el promedio de cada propiedad mecánica del PETG en cada caso específico.

Cuadro 3: Propiedades mecánicas del PETG con 50 % de relleno y patrón de impresión *grid*.

No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última
1	0.90 GPa	22.58 MPa	24.77 MPa
2	0.94 GPa	23.95 MPa	24.63 MPa
3	0.99 GPa	21.07 MPa	24.27 MPa
4	0.96 GPa	20.28 MPa	24.65 MPa
5	0.84 GPa	22.06 MPa	24.05 MPa
Promedio	0.93 GPa	21.99 MPa	24.47 MPa

Fuente: (Oliva, 2022)

Cuadro 4: Propiedades mecánicas del PETG con 75 % de relleno y patrón de impresión *grid*.

No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última
1	1.10 GPa	25.44 MPa	26.85 MPa
2	-	-	-
3	1.12 GPa	19.40 MPa	20.14 MPa
4	1.07 GPa	22.62 MPa	23.56 MPa
5	1.17 GPa	19.63 MPa	20.89 MPa
Promedio	1.12 GPa	21.77 MPa	22.86 MPa

Fuente: (Oliva, 2022)

Cuadro 5: Propiedades mecánicas del PETG con 100 % de relleno y patrón de impresión *grid*.

No. de ensayo	Módulo de Young	Resistencia a la fluencia	Resistencia última
1	-	-	-
2	1.69 GPa	32.26 MPa	36.25 MPa
3	1.92 GPa	30.64 MPa	37.63 MPa
4	1.36 GPa	30.84 MPa	37.30 MPa
5	1.67 GPa	33.07 MPa	37.60 MPa
Promedio	1.66 GPa	31.70 MPa	37.20 MPa

Fuente: (Oliva, 2022)

Con base en los promedios previamente expuestos, se realizó una extrapolación para obtener una aproximación de las propiedades al utilizar 25 % de relleno. Según (Mercado, 2020), la razón de Poisson del PETG es 0.38, por lo que las propiedades mecánicas utilizadas fueron las siguientes:

Cuadro 6: Propiedades mecánicas del PETG con 25 % de relleno y patrón *grid*.

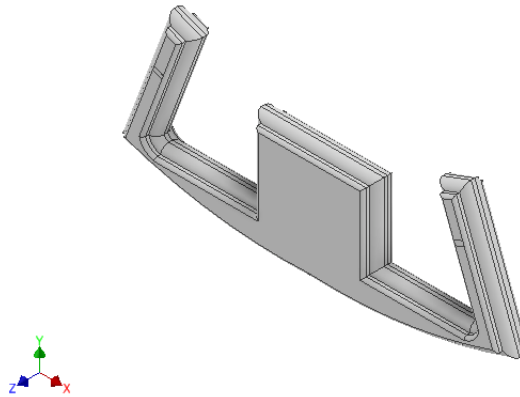
Propiedad mecánica	Valor
Módulo de elasticidad	0.565 GPa
Razón de Poisson	0.38
Resistencia a la fluencia	17.135 MPa
Resistencia última a la tensión	18.105 MPa

Fuente: (Oliva, 2022) (Mercado, 2020).

### 6.3.2. Diseño preliminar (maquinado en aluminio)

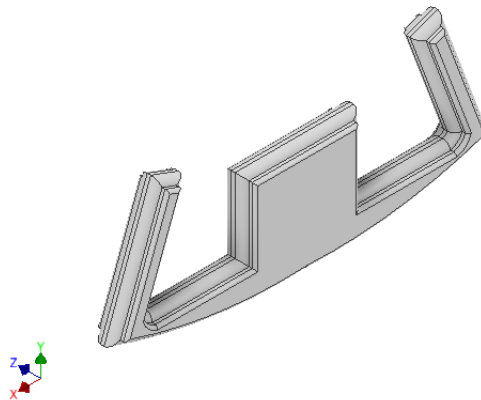
El yugo, inspirado en el de un Cessna 172, fue inicialmente diseñado con base en dimensiones que parecían realistas, realizando el bosquejo de manera que tuviera la mayor semejanza posible a un yugo real.

Figura 9: Primera iteración de yugo (vista isométrica frontal).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

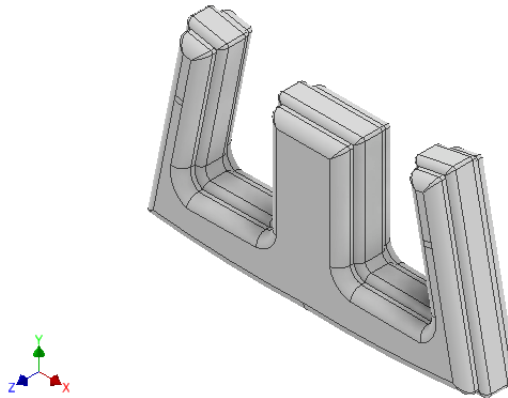
Figura 10: Primera iteración de yugo (vista isométrica posterior).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

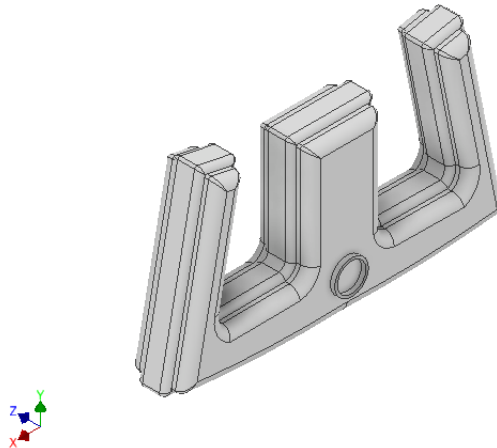
Entre los requisitos establecidos se encontraba que las dimensiones del yugo no debían tener una diferencia mayor al 15% respecto a las del utilizado en un Cessna 172. Además, se especificó que no debían existir bordes afilados ni superficies punzantes. En la geometría de la Figura 1, se identificaron bordes que podrían haber causado inconvenientes en ciertas situaciones. Se optó por realizar un nuevo diseño, incorporando una mayor cantidad de filetes para resolver este problema. Por otro lado, se ajustaron las dimensiones para acercarlas más a las del componente real, resultando en 300 mm de base, 168 mm de altura y 50 mm de grosor. Además, se añadió una extrusión circular en la cara posterior para anclar un eje mediante un tornillo. Por último, se agregaron dos superficies, una en cada agarrador, que permitirían colocar las cargas en el software de análisis.

Figura 11: Segunda iteración de yugo (vista isométrica frontal).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 12: Segunda iteración de yugo (vista isométrica posterior).

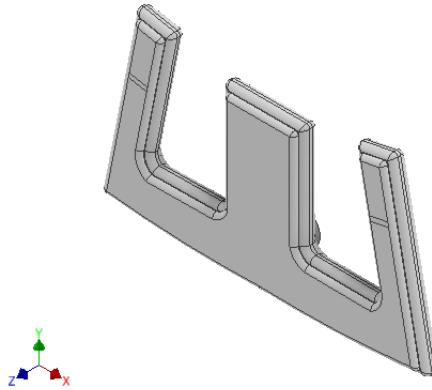


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

En este punto, el inconveniente era el peso total del yugo, que era de 3.362 kg al utilizar aluminio 6061. Por esta razón, se contempló realizar el maquinado en dos partes para luego unir las mediante tornillos. Dado que el grosor del yugo era de 50 mm, se maquina cada

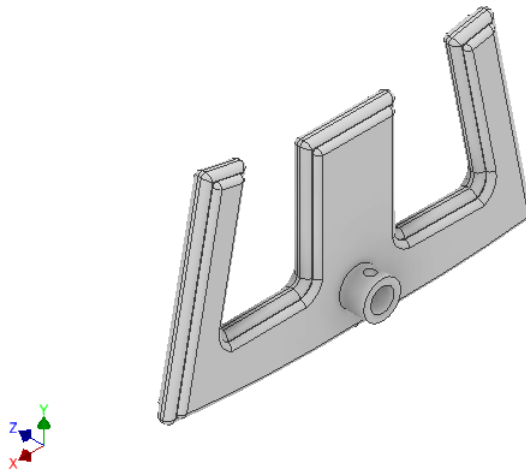
mitad de 10.7 mm y luego se agregarían los 28.6 mm restantes integrando un espaciador de madera. Esto disminuiría el peso del aluminio a aproximadamente 1.506 kg, mientras que la madera tendría un peso aproximado de 0.65 kg. Ahorrando 1.206 kg de peso, se hubiera modificado la extrusión circular para anclar el eje, aumentando su longitud para poder colocar el tornillo.

Figura 13: Tercera iteración de yugo (vista isométrica frontal).



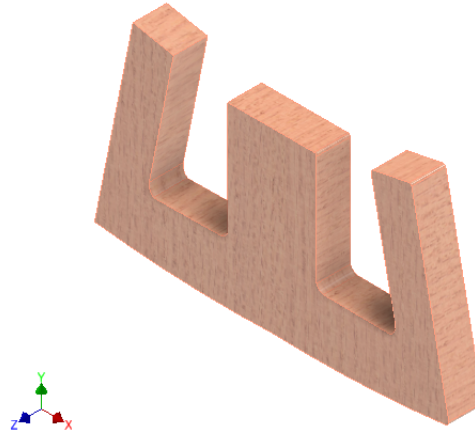
Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 14: Tercera iteración de yugo (vista isométrica posterior).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 15: Espaciador de madera para tercera iteración de yugo (vista isométrica frontal).

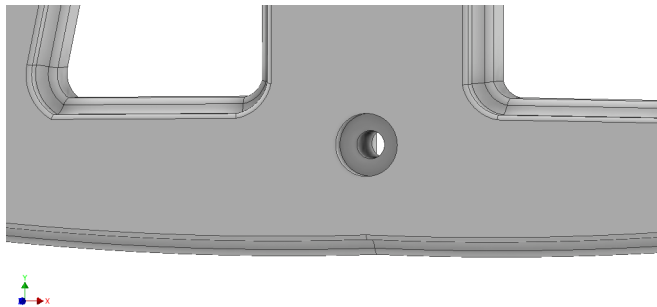


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

### 6.3.3. Diseño final (impreso en 3D)

Para la impresión 3D del yugo, se utilizó como base la segunda iteración del mismo. Manteniendo las dimensiones generales intactas, las primeras modificaciones realizadas fueron en cuanto al anclaje del eje. Originalmente, se consideró crear una extrusión circular en la cara posterior del yugo para insertar el eje y fijarlo con un tornillo (Figura 6). Siendo el PETG menos resistente que el aluminio, la idea de colocar un tornillo en una superficie delgada no era viable, ya que esta estaría sometida a esfuerzos. Por lo tanto, se decidió que el eje ingresaría 20 mm en la pieza, para luego fijarlo con un tornillo M8 que entraría por la cara frontal del yugo a través de un agujero con un diámetro de 9 mm. Así, el tornillo tensaría el eje hasta que entrara en contacto con las paredes de material dentro de la pieza, quedando restringido de cualquier movimiento.

Figura 16: Entrada de tornillo en cara frontal del yugo.

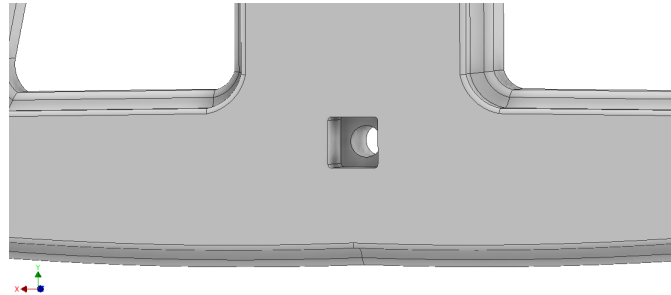


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Como se observa en la Figura 8, se colocó un primer agujero con un diámetro de 20 mm y una profundidad de 6.6 mm. Con esta profundidad, la cabeza del tornillo no sobresaldría de la cara frontal del yugo, considerando que se colocaría una arandela. De igual forma, el diámetro seleccionado crearía espacio suficiente para apretar el tornillo con una copa. Luego,

sobre este agujero, se realizó un segundo que atravesaría el yugo, permitiendo el paso del tornillo.

Figura 17: Entrada de eje en cara posterior del yugo.

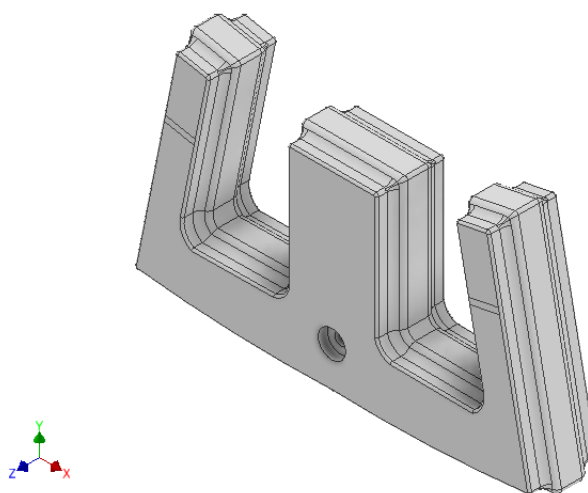


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

La entrada del eje se realizó con una geometría cuadrada (14.5 mm x 14.5 mm) ya que, de haber sido circular, el tornillo habría estado sujeto al torque ocasionado por el giro. Esto podría haber causado que se desenroscara del eje al alcanzar el final del movimiento. Con el diseño elegido, el eje transmitiría el torque al yugo, dejando al tornillo exclusivamente como un elemento de fijación.

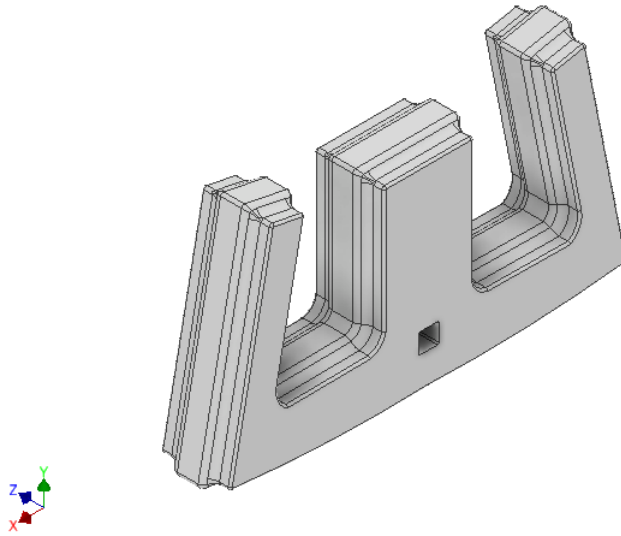
Las siguientes modificaciones realizadas al yugo fueron los filetes. Al utilizar el software de impresión para preparar las configuraciones, se observó que los filetes debían estar más cercanos a un ángulo de  $45^{\circ}$ , por lo que se ajustaron. De no haberse hecho este ajuste, habría sido necesario utilizar más material para los soportes, y, aun así, era muy probable que la impresión no resultara satisfactoria, dado que el material no habría tenido la capacidad de adherirse completamente para formar la geometría deseada.

Figura 18: Diseño final de yugo (vista isométrica frontal).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 19: Diseño final de yugo (vista isométrica posterior).



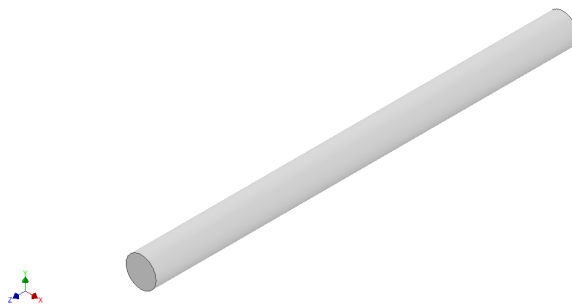
Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

#### 6.3.4. Validación de la precisión de cálculos en el software de análisis

Durante su uso, un yugo es empujado, jalado y girado. Esto significa que estaría sometido a esfuerzos de flexión y torsión. Por medio del software *ANSYS Workbench*, se realizaron análisis estáticos estructurales para determinar el valor de los esfuerzos generados, obteniendo también el factor de seguridad en cada movimiento.

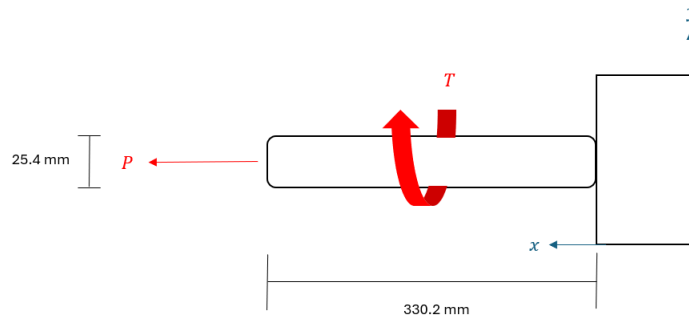
Antes de realizar el análisis del yugo, se realizó una simulación de una barra cilíndrica de aluminio 6061 con una longitud de 330.2 mm y un diámetro de 25.4 mm. Esta barra estaría sometida a tensión y torsión, estando empotrada en uno de sus extremos.

Figura 20: Barra cilíndrica.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 21: Diagrama de cuerpo libre de barra cilíndrica empotrada.



Fuente: Elaboraci3n propia.

Las propiedades mecánicas utilizadas para el aluminio 6061 fueron las siguientes:

Cuadro 7: Propiedades mecánicas del aluminio 6061.

Propiedad mecánica	Valor
M3dulo de elasticidad	68.9 GPa
Raz3n de Poisson	0.33
Resistencia a la fluencia	270 MPa
Resistencia 3ltima a la tensi3n	310 MPa

Fuente: (MatWeb, [2023](#)).

Se utilizaron fuerzas asumidas de 178 N en tensi3n y 20 N·mm en torsi3n. Con esto, se calcul3 el esfuerzo equivalente de von Mises, lo cual tambi3n se realiz3 de forma manual para comparar los resultados. De este modo, se pudo confirmar que el archivo del software utilizado para realizar los análisis del trabajo proporcionaba resultados precisos.

### Cálculos en el software

Como primer paso, se seleccion3 un análisis estático estructural, para luego importar la geometría. Habiendo creado el material correspondiente con las propiedades del Cuadro 7, se asign3 a la barra y se edit3 el mallado. Aplicando el método *Sweep* y una resoluci3n de 4, se obtuvo un promedio de calidad en el mallado de 0.312, basado en el análisis *Skewness*. Seg3n el Cuadro 8, que se expone a continuaci3n, el mallado fue bueno.

Cuadro 8: Calidades de mallado según valor de *Skewness*.

Valor de <i>Skewness</i>	Calidad del mallado
$> 0.95$	Inaceptable
$0.9 - < 0.95$	Malo
$0.75 - 0.9$	Pobre
$0.5 - 0.75$	Justo
$0.25 - 0.5$	Bueno
$> 0 - 0.25$	Excelente
0	Equilátero

Fuente: (ANSYS, 2019).

Figura 22: Mallado en barra cilíndrica.

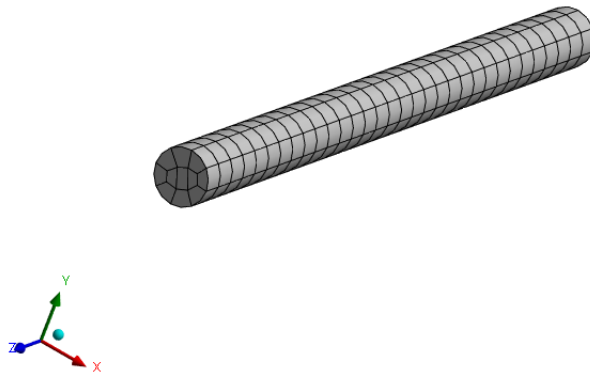


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Seguidamente, se colocó un soporte fijo en uno de los extremos de la barra para simular el empotramiento.

Figura 23: Colocación de soporte fijo en barra cilíndrica.

A: Validación de Precisión de Cálculos con Barra Cilíndrica

■ Fixed Support

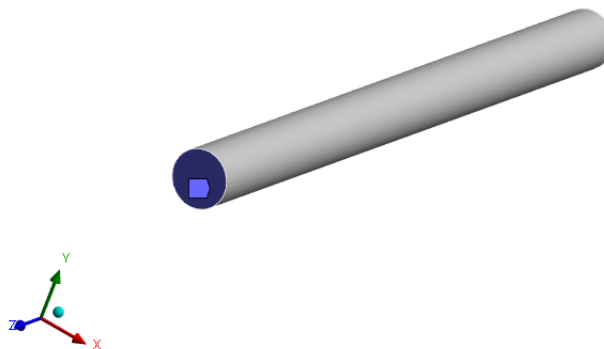


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Sabiendo que la barra estaba sometida a tensión, se aplicó una fuerza de 178 N en su extremo opuesto, en dirección al eje Z negativo.

Figura 24: Colocación de fuerza a tensión en barra cilíndrica.

A: Validación de Precisión de Cálculos con Barra Cilíndrica

Force: 178. N  
Components: 0,0,-178.

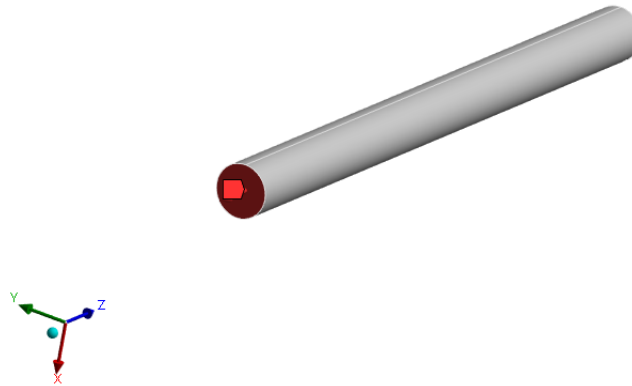


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Por último, se aplicó un momento de 20 N·mm a la geometría completa, definiéndolo mediante vectores. Al tratarse de un giro, la dirección seleccionada fue el eje Z, mientras que las demás direcciones quedaron restringidas a cualquier movimiento.

Figura 25: Colocación de momento de giro en barra cilíndrica.

A: Validación de Precisión de Cálculos con Barra Cilíndrica

Moment: 20. N-mm  
Components: 0,0,20. N-mm

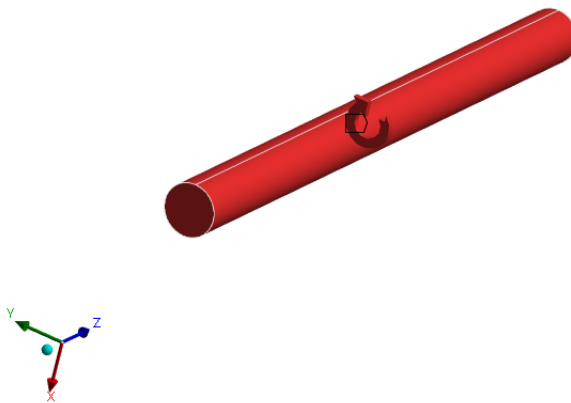


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Con lo anterior definido, se resolvió para obtener el esfuerzo equivalente de von Mises.

Figura 26: Esfuerzo equivalente de von Mises de 0.38575 MPa en barra cilíndrica.

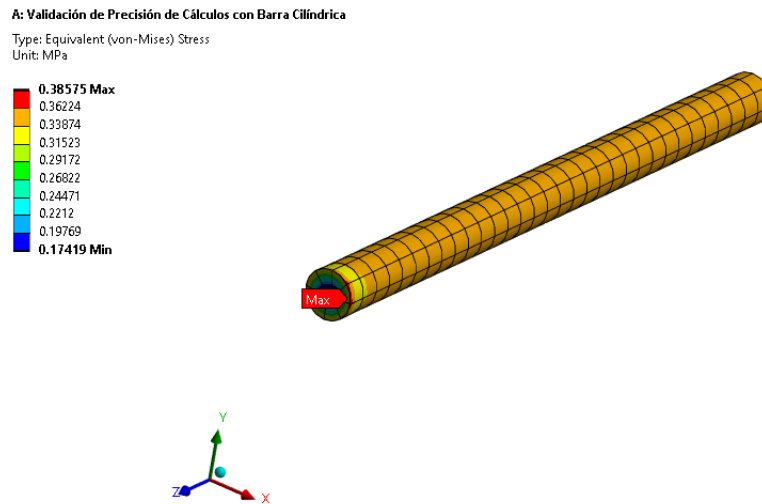


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

## Cálculos manuales

En este caso, la flexión no fue tomada en cuenta, ya que el largo y el diámetro de la barra eran mayores a 10 mm. Para determinar que la barra no fallara, se asumió que estaba empotrada al momento de ser sometida a los esfuerzos.

En base a la Figura 13, lo primero a calcular fue el área de la barra:

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) (25.4mm)^2 = 506.707mm^2 \quad (1)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la misma (25.4 mm).

Seguidamente, se obtuvo el esfuerzo normal a tensión:

$$\sigma = \left(\frac{P}{A}\right) = \left(\frac{178N}{506.707mm^2}\right) = 0.351MPa \quad (2)$$

Donde  $P$  es la fuerza a tensión de 178 N, y  $A$  es el área obtenida en la ecuación 1.

Se calculó el momento polar:

$$J = \left(\frac{\pi}{32}\right) D^4 = \left(\frac{\pi}{32}\right) (25.4mm)^4 = 40863.425mm^4 \quad (3)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la barra, de 25.4 mm<sup>2</sup>.

Luego, se obtuvo el esfuerzo de torsión:

$$\tau = \left(\frac{Tp}{J}\right) = \left(\frac{(20Nmm)(12.7mm)}{40863.425mm^4}\right) = 0.006MPa \quad (4)$$

Donde  $T$  es el torque aplicado de 20 N·mm,  $p$  es el medio diámetro de la barra, de 12.7 mm, y  $J$  es el momento polar obtenido en la ecuación 3.

La barra solamente sufrió esfuerzo normal a tensión en el eje x y esfuerzo de torsión en los ejes x e y. Con esto, se calculó el esfuerzo equivalente de von Mises:

$$\sigma' = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} = ((0.351MPa)^2 + 3(0.006MPa)^2)^{1/2} = 0.351MPa \quad (5)$$

Donde  $\sigma_x$  es el esfuerzo normal a tensión obtenido en la ecuación 2, y  $\tau_{xy}$  el esfuerzo de torsión obtenido en la ecuación 4.

### Comparación de resultados

Tras realizar el cálculo por medio de la simulación y de forma manual, se pudo comparar los resultados:

Cuadro 9: Comparación de esfuerzo equivalente de von-Mises entre simulación y cálculo manual.

Valor en simulación	Valor en cálculo manual	Porcentaje de error
0.386 MPa	0.351 MPa	9.97 %

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener un porcentaje de error menor al 10 %, se determinó que el software entregaba resultados precisos, por lo que era válido utilizarlo. Como se puede observar, los resultados entregados por el software fueron mayores.

### 6.3.5. Cálculos por medio de análisis estático estructural en el software de análisis

Antes de realizar las simulaciones, se creó el material correspondiente utilizando las propiedades mecánicas del PETG (Cuadro 6). Asimismo, antes de importar la geometría del yugo, se simplificó eliminando todos los filetes para evitar una complejidad innecesaria en el mallado, lo que podría haber reducido la precisión de los cálculos.

Figura 27: Yugo simplificado (vista isométrica frontal).

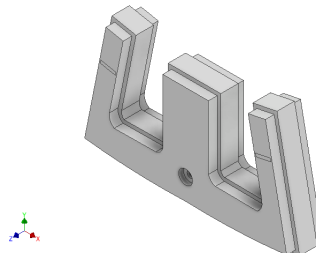


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 28: Yugo simplificado (vista isométrica posterior).

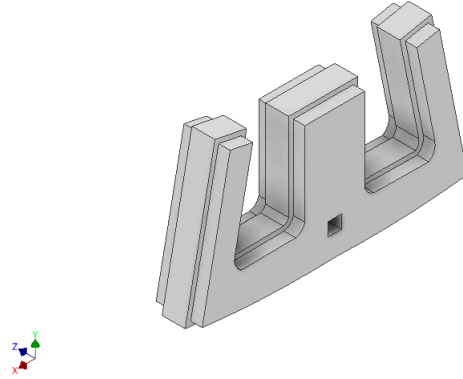


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

## Jalado

Habiendo importado la geometría simplificada y asignado el material, se editó el mallado utilizando el método *Patch Conforming* y una resolución de 4, con lo que se obtuvo un promedio en la calidad de 0.36247. Según el Cuadro 8, basado en el análisis *Skewness*, el mallado fue bueno.

Figura 29: Mallado en yugo.

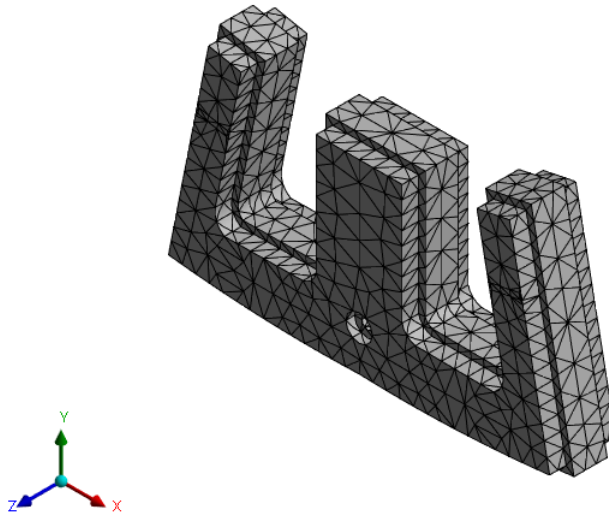


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Para determinar si la geometría soportaría la fuerza de jalado, se colocó un soporte fijo en el orificio donde iría la cabeza del tornillo, manteniendo así el yugo en su lugar durante el movimiento.

Figura 30: Colocación de soporte fijo en yugo (jalado).

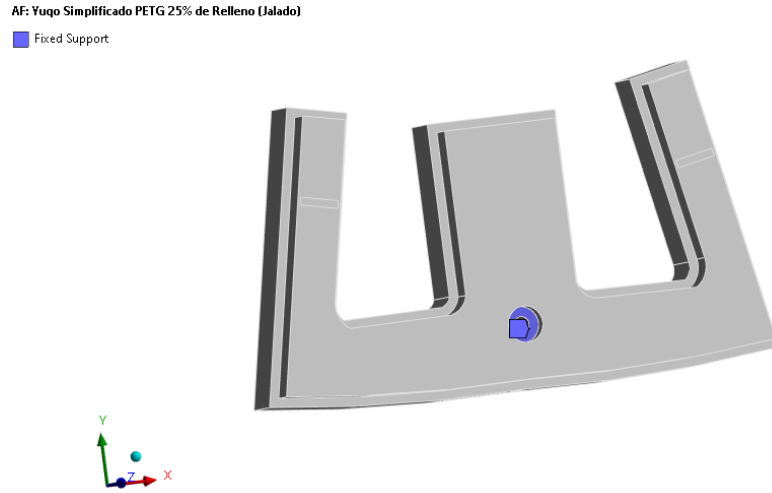


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Se sabe que, durante un vuelo, las manos y antebrazos del piloto generaron un peso de 4.6 kg (45.1106 N) en el yugo (Ideal, 2016). Además, en una aeronave Cessna 172, el piloto debía aplicar 44.5 N para poder jalar y empujar el yugo (European Aviation Safety Agency, 2003). Sabiendo esto, se colocó una fuerza de 22.25 N en cada uno de los agarradores, en dirección al eje Z positivo. Se realizó el mismo procedimiento para el peso de las manos y antebrazos, colocando una fuerza de 22.56 N en cada agarrador, en dirección al eje Y negativo.

Figura 31: Colocación de fuerzas en yugo (jalado).

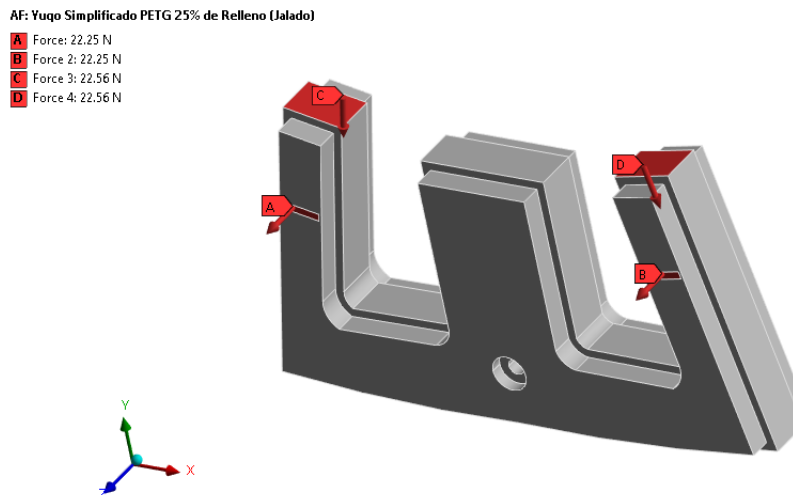


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Con lo anterior realizado, se resolvió para obtener la deformación total, el esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad.

Figura 32: Deformación total máxima de 0.55346 mm en yugo (jalado).

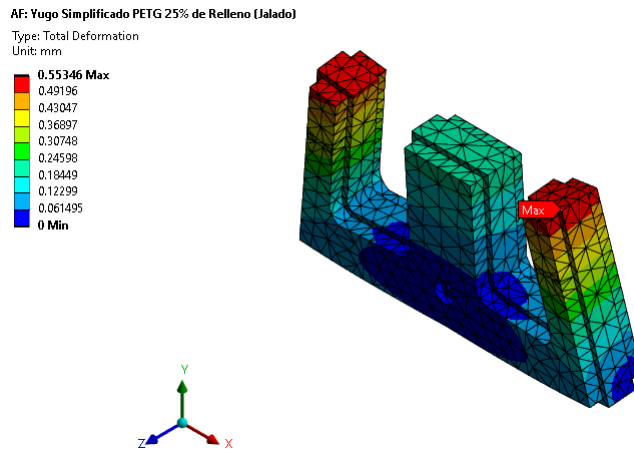


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 33: Esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 0.63739 MPa en yugo (jalado).

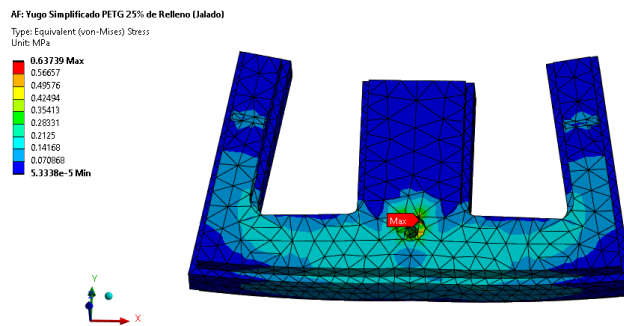


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 34: Factor de seguridad mínimo de 15 en yugo (jalado).

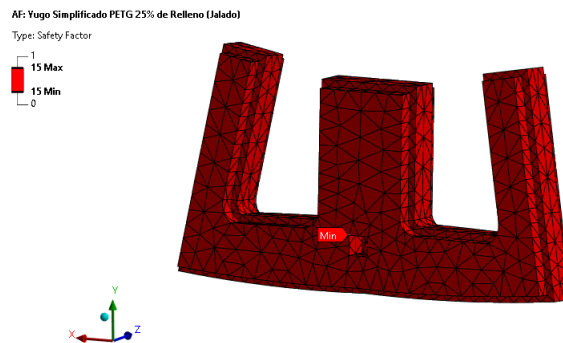


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

## Empuje

En la simulación de empuje, se realizó el mismo procedimiento para el mallado, obteniendo el mismo valor y apariencia. Para determinar si el yugo soportaría la fuerza de empuje, se colocó un soporte fijo en la pared de material donde entraría en contacto con el extremo del eje.

Figura 35: Colocación de soporte fijo en yugo (empuje).

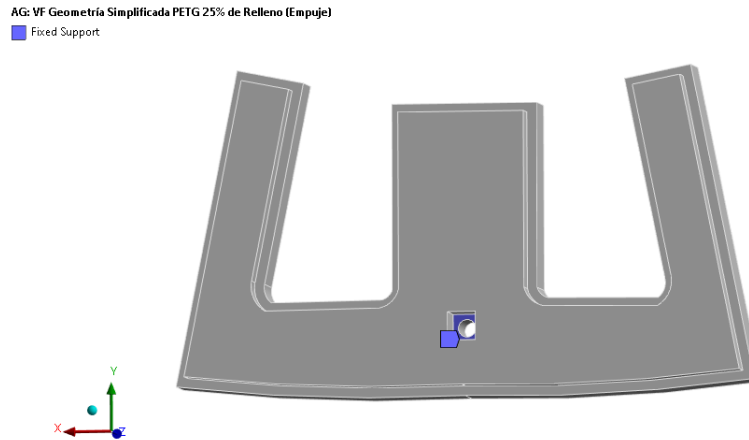


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

La colocación de las fuerzas fue la misma que en la simulación de jalado, con la diferencia de que las fuerzas A y B fueron orientadas en dirección al eje Z negativo.

Figura 36: Colocación de fuerzas en yugo (empuje).

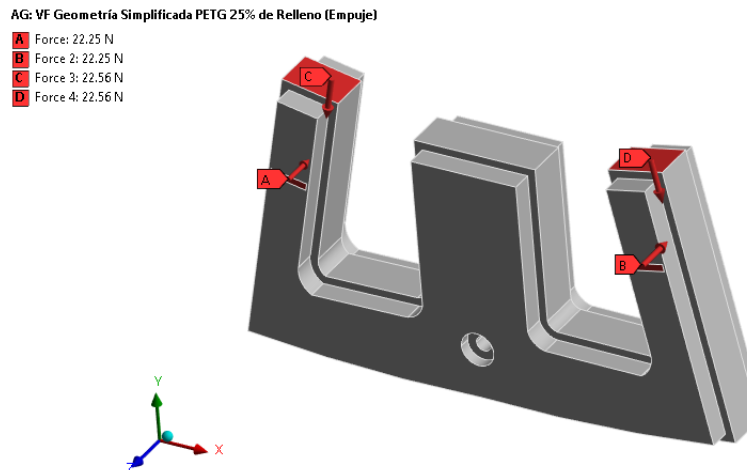


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Luego, se calculó la deformación total, esfuerzo equivalente de von Mises y el factor de seguridad.

Figura 37: Deformación total máxima de 0.68624 mm en yugo (empuje).

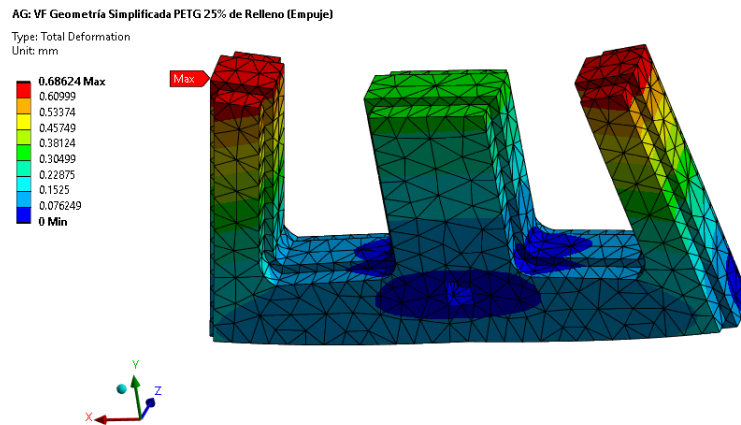


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 38: Esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 0.82555 MPa en yugo (empuje).

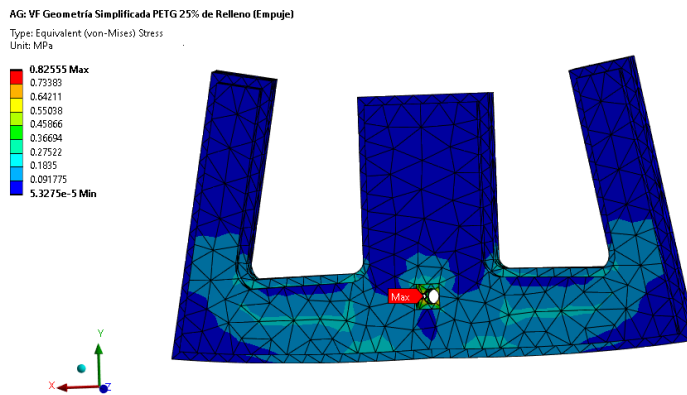


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 39: Factor de seguridad mínimo de 15 en yugo (empuje).

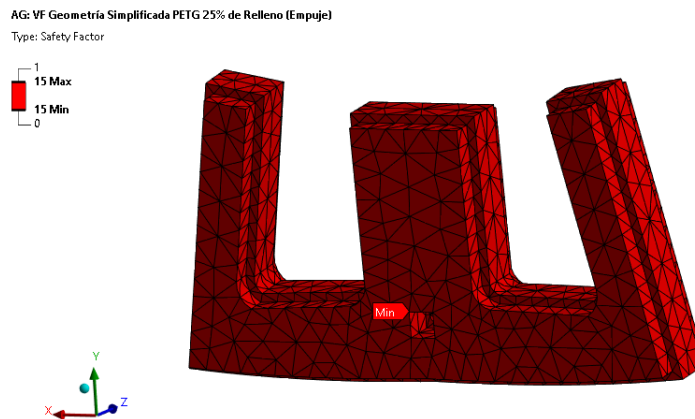


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

## Giro

Se sabe que el piloto debía aplicar 22 N de fuerza para girar el yugo en una aeronave Cessna 172 (European Aviation Safety Agency, 2003). Sin embargo, para realizar la simulación, se necesitó esta fuerza expresada en términos de torque. Multiplicando el radio del timón (150 mm) por la fuerza ejercida (22 N), se obtuvo un torque de 3300 N·mm.

Tras realizar el mismo procedimiento para el mallado, se colocó un soporte fijo en en las paredes laterales y pared expuesta en la Figura 27 de la entrada del eje, donde se transmitiría el torque.

Figura 40: Colocación de soporte fijo en yugo (giro).

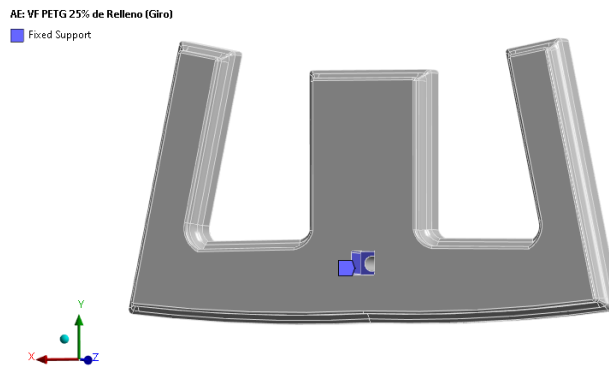


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Luego, se aplicó un momento de 3300 N·mm a la geometría completa, definido por vectores. Al tratarse de un giro, la dirección seleccionada fue el eje Z, mientras que las demás direcciones quedaron restringidas a cualquier movimiento. Al igual que en las simulaciones de empuje y jalado, se colocó el peso de las manos.

Figura 41: Colocación de momento y fuerzas en yugo (giro).

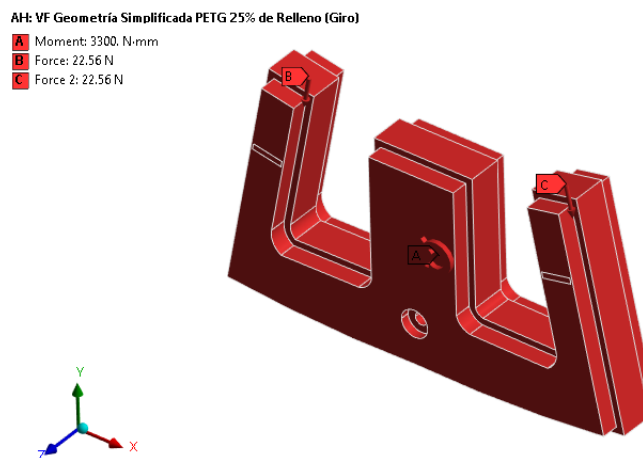


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Se resolvió para obtener los mismos resultados que en el caso de empuje y jalado.

Figura 42: Deformación total máxima de 0.26349 mm en yugo (giro).

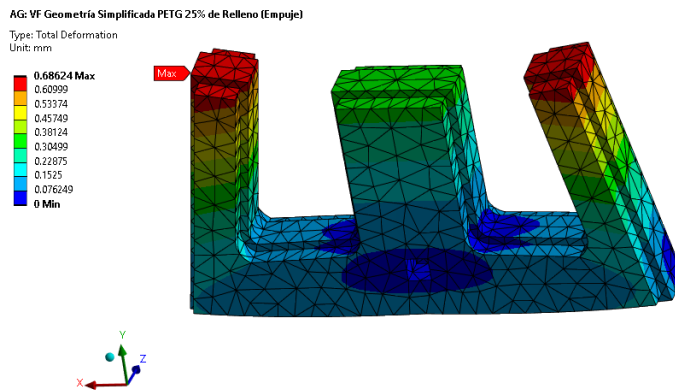


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 43: Esfuerzo equivalente de von Mises máximo de 0.36816 MPa en yugo (giro).

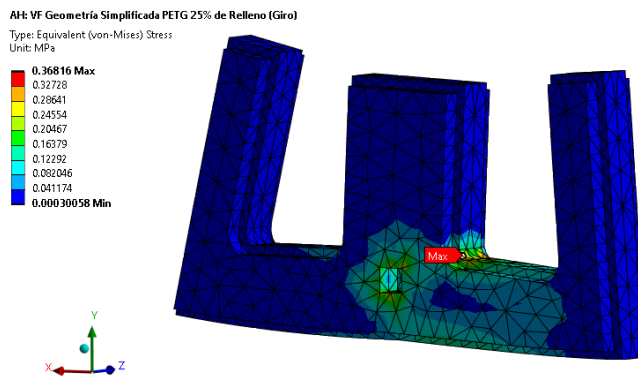


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 44: Factor de seguridad mínimo de 15 en yugo (giro).

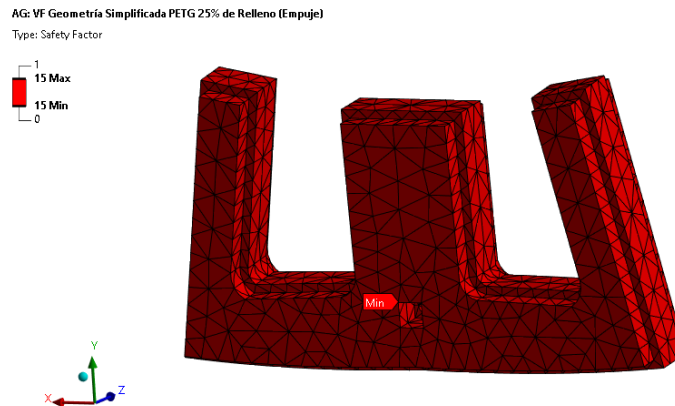


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

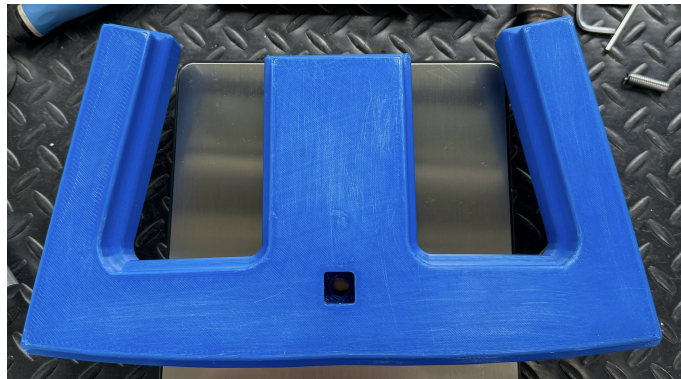
### 6.3.6. Impresión

Tras comprobar que el yugo soportaría los esfuerzos en cada movimiento con factores de seguridad mayores a 1.5, se procedió a realizar la impresión 3D del mismo. Los ajustes importantes que se editaron en el software de impresión fueron los siguientes:

- Material: PETG
- Porcentaje de relleno: 25 %
- Patrón de relleno: *Grid*
- Estructura de soporte: *Tree*
- Ángulo máximo para soportes: 60°

Con lo anterior definido, la impresión tuvo una duración de 14 horas y 44 minutos, y un peso de 592 g. Con el yugo impreso, se utilizó una lija para eliminar restos de soporte, suavizar los bordes que tenían exceso de material y, en general, mejorar el aspecto físico de la impresión.

Figura 45: Yugo impreso.



Fuente: Elaboración propia.

### 6.4. Eje y chumaceras

Habiendo sido el propósito del eje generar la conexión entre el yugo y el sistema de retroalimentación de fuerza, se requirió la instalación de dos chumaceras de banco. Esto permitió el giro y desplazamiento longitudinal del eje al estar colocado en su lugar de operación. De un proyecto ajeno realizado en la universidad, sobraron dos chumaceras, cada una conformada por un rodamiento NTN UC204-012 y una carcasa NTN P203J. Al ser estos componentes disponibles para aplicarse en este trabajo, se optó por utilizarlos.

Figura 46: Rodamiento auto-alineable de bolas NTN UC204-012.



Fuente: (NTN, 2020a).

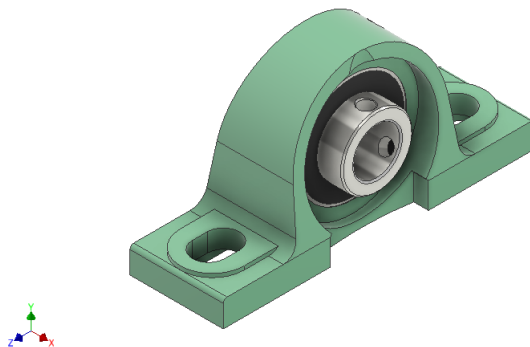
Figura 47: Carcasa NTN P203J.



Fuente: (Amazon, 2024).

Se utilizó un modelo 3D de la chumacera brindado por NTN Europa, siendo este lo más acercado posible a la pieza real:

Figura 48: Chumacera 3D.



Fuente: (NTN, 2023). Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

### 6.4.1. Diseño del eje

El eje fue diseñado y maquinado a partir de una barra cilíndrica de aluminio 6061, con un diámetro inicial de 25.4 mm y una longitud de 330.2 mm. Este material fue seleccionado por su peso ligero, accesibilidad, buenas propiedades mecánicas y para generar un mayor realismo en el componente, dado que el aluminio es un material utilizado en la industria aeronáutica (CMP, 2020).

Se utilizó el acelerador de diseño del software *Autodesk Inventor* para crear el eje, el cual consta de tres secciones.

Figura 49: Secciones de eje.

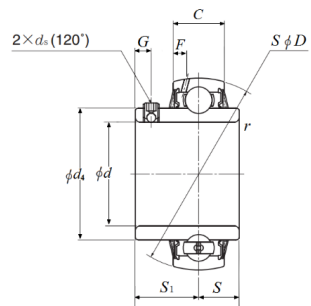


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

De izquierda a derecha, y considerando que el rodamiento tiene un diámetro interno de 19.05 mm, la primera sección tuvo un diámetro de 19.05 mm y una longitud de 63.5 mm. La segunda sección tuvo un diámetro de 22.225 mm y una longitud de 76.2 mm, ya que los hombros debían tener un diámetro mayor que el interno del rodamiento y se tenía en cuenta que se realizaría un cilindrado al eje para obtener una superficie libre de imperfecciones. La tercera sección tuvo el mismo diámetro que la primera, con una longitud de 190.5 mm. Esta última fue diseñada para proporcionar un mayor desplazamiento visual al realizar el empuje y jalado.

Se sabe que los rodamientos cuentan con un radio de borde en su diámetro interior, el cual asegura un encaje correcto con el hombro del eje. Dado que los rodamientos utilizados tienen un radio de borde de 1 mm, se colocaron filetes de la misma medida en los hombros del eje.

Figura 50: Radio de borde ( $r$ ) de 1 mm en rodamiento NTN UC204-012.



Fuente: (NTN, 2020a).

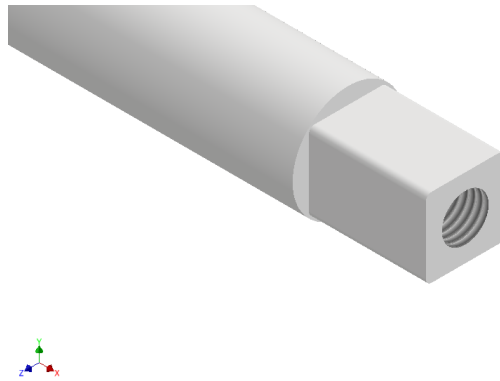
Figura 51: Filetes de 1 mm en hombros de la segunda sección del eje.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Por último, en el extremo de la tercera sección del eje, se creó el punto de encaje con el yugo, que tiene una geometría cuadrada de 14.5 mm de base, 14.5 mm de altura y 20 mm de profundidad, con cuatro filetes de 1 mm y un agujero de 8 mm de diámetro con rosca M8.

Figura 52: Punto de encaje con el yugo en eje.

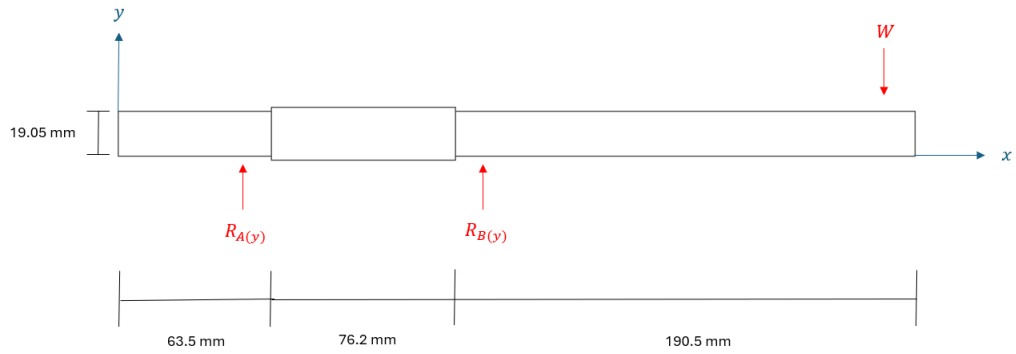


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

## Cálculos de eje

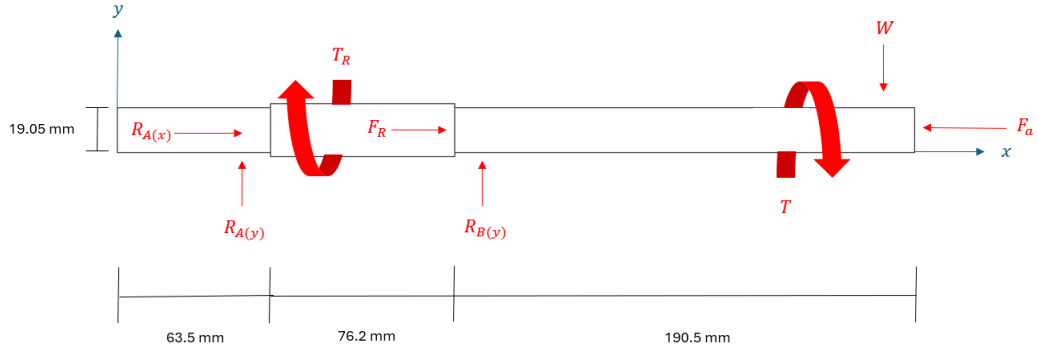
Para calcular el factor de seguridad del eje mediante la teoría de Goodman modificada, se consideró que este estaría sometido a un caso de esfuerzo mínimo y a un caso de esfuerzo máximo, los cuales serían alternantes durante su uso. Esto se analizó mediante la superposición de esfuerzos y la teoría de von Mises para combinación de esfuerzos. El caso de esfuerzo mínimo incluyó únicamente el peso del yugo y las manos del piloto. El caso máximo incluyó lo anterior, más las fuerzas ejercidas durante el jalado, empuje y giro. Dado que el principal punto crítico del eje se encuentra en el hombro de la tercera sección, el procedimiento se realizó en torno al diámetro de este (19.05 mm).

Figura 53: Diagrama de cuerpo libre de caso de esfuerzo mínimo en eje.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 54: Diagrama de cuerpo libre de caso de esfuerzo máximo en eje.



Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 45 y 46, las variables expuestas son las siguientes:

- $W$  = Peso combinado del timón y manos del piloto.
- $T$  = Torque ejercido por el piloto al girar el yugo.
- $F_a$  = Fuerza ejercida por el piloto al empujar o jalar el yugo.
- $F_R$  = Fuerza de empuje o jalado ejercida por los resortes.
- $T_R$  = Torque ejercido por los resortes.
- $R_{A(x)}$  = Reacción de la chumacera A en el eje x.
- $R_{A(y)}$  = Reacción de la chumacera A en el eje y.
- $R_{B(y)}$  = Reacción de la chumacera B en el eje y.

Primero, se calculó el area del eje:

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.01905m)^2 = 0.000285m^2 \quad (6)$$

Donde  $D$  es el diámetro a utilizar, de 0.01905 m.

Se obtuvo el momento de inercia del eje:

$$I = \left(\frac{\pi}{4}\right) r^2 = \left(\frac{\pi}{4}\right) (0.009525m)^4 = 6.46x10^{-9}m^4 \quad (7)$$

Donde  $r$  es el radio del mismo, de 0.009525 m.

Siguiente, se calculó el momento polar:

$$J = 2(I) = 2(6.46x10^{-9}m^4) = 1.292x10^{-8}m^4 \quad (8)$$

Donde  $I$  es el momento de inercia obtenido en la ecuación 7.

Fue necesario calcular el momento máximo de ambos casos de esfuerzo:

$$M_{max} = W * d = (50.93N)(0.175m) = 8.91Nm \quad (9)$$

Donde  $W$  es el peso de 50.93 N, y  $d$  es la distancia entre la fuerza y el punto crítico del eje, que es de 20 mm.

Después, se calculó el esfuerzo máximo en el caso de esfuerzo mínimo:

$$\sigma_{max} = \left(\frac{M_{max} * c}{I}\right) = \left(\frac{(8.91Nm)(0.009525m)}{6.46x10^{-9}m^4}\right) = 1.313x10^7 Pa = 13.13MPa \quad (10)$$

Donde  $M_{max}$  es el momento máximo obtenido en la ecuación 9,  $c$  el centroide de 0.009525 m, e  $I$  el momento de inercia resultante de la ecuación 7.

En el caso de esfuerzo máximo, se determinó el esfuerzo axial en el eje x mediante superposición de esfuerzos:

$$\sigma_x = \frac{F_a}{A} + \frac{M_{max} * c}{I} = \frac{44.5N}{0.000285m^2} + \frac{(8.91Nm)(0.009525)}{6.46x10^{-9}m^4} = 1.329x10^7 Pa \quad (11)$$

Donde  $F_a$  es la fuerza de empuje de 44.5 N,  $A$  es el área obtenida en la ecuación 6,  $M_{max}$  es el momento máximo obtenido en la ecuación 9,  $c$  es el centroide de 0.009525 m, e  $I$  es el momento de inercia resultante de la ecuación 7.

Luego, se calculó el esfuerzo cortante por torsión en el eje:

$$\tau_{xy} = \frac{T * c}{J} = \frac{(3.3Nm)(0.009525m)}{1.292x10^{-8}m^4} = 2.432x10^6 Pa \quad (12)$$

Donde  $T$  es el torque ejercido por el usuario de 3.3 N·m,  $c$  es el centroide de 0.009525 m, y  $J$  es el momento polar obtenido en la ecuación 8.

Con esto, se pudo definir el esfuerzo de von Mises por combinación de esfuerzos:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + 3(\tau_{xy})^2} = \sqrt{(1.329x10^7)^2 + 3(2.4432x10^6)^2} = 1.394x10^7 Pa = 13.94MPa \quad (13)$$

Donde  $\sigma_x$  es el esfuerzo axial en el eje x obtenido de la ecuación 7, y  $\tau_{xy}$  es el esfuerzo cortante por torsión resultante en la ecuación 12.

Se calculó el esfuerzo medio entre el caso de esfuerzo máximo y mínimo:

$$\sigma_m = \frac{\sigma' - \sigma_{max}}{2} = \frac{13.94MPa - 13.13MPa}{2} = 0.405MPa \quad (14)$$

Donde  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo resultante de la ecuación 10, y  $\sigma'$  es el esfuerzo de von Mises por combinación de esfuerzos, obtenido en la ecuación 13.

El esfuerzo alternante fue calculado utilizando el mismo procedimiento de la ecuación 14, pero en vez de restar los esfuerzos, se sumaron:

$$\sigma_a = \frac{\sigma' + \sigma_{max}}{2} = \frac{13.94MPa + 13.13MPa}{2} = 13.535MPa \quad (15)$$

Donde  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo resultante de la ecuación 10, y  $\sigma'$  es el esfuerzo de von Mises por combinación de esfuerzos, obtenido en la ecuación 13.

El límite de resistencia a la fatiga fue calculado por medio de la ecuación de Marín, la cual consta de siete factores que deben ser operados:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (16)$$

Donde  $k_a$  es el factor de modificación por la condición superficial,  $k_b$  es el factor de modificación por el tamaño,  $k_c$  es el factor de modificación por la carga,  $k_d$  es el factor de modificación por la temperatura,  $k_e$  es el factor de confiabilidad,  $k_f$  es el factor de modificación por efectos varios, y  $S'_e$  es el límite de resistencia a la fatiga en viga rotaria.

Primero, se calculó el límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria:

$$S'_e = S_{ut} * 0.5 = (310MPa)(0.5) = 155MPa \quad (17)$$

Donde  $S_{ut}$  es la resistencia última a la tensión del aluminio 6061 (ver cuadro 7).

Se calculó el factor de modificación por la condición superficial, suponiendo que el eje es un elemento maquinado o laminado en frío:

$$k_a = a S_{ut}^b = (4.51)(310MPa)^{-0.265} = 0.986 \quad (18)$$

Donde el factor  $a$  es 4.51 y el exponente  $b$  es -0.265 (Budynas & Nisbett, 2015).  $S_{ut}$  es la resistencia última a la tensión del aluminio 6061.

Para calcular el factor de modificación por el tamaño, (Budynas & Nisbett, 2015) indica utilizar la siguiente ecuación:

$$k_b = 1.24d^{-0.107} = (1.24)(19.05)^{-0.107} = 0.904 \quad (19)$$

Donde  $d$  es el diámetro analizado de 19.05 mm.

Existiendo flexión en el eje, el factor de modificación por la carga es 1 (Budynas & Nisbett, 2015).

Para calcular el factor de modificación por la temperatura, se utilizó la siguiente ecuación (Budynas & Nisbett, 2015) :

$$k_d = 0.9750 + 432(10^{-3})T_F - 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4 = 1 \quad (20)$$

Donde  $T_F$  es la temperatura de operación asumida de 77 °F.

El factor de confiabilidad fue obtenido mediante la siguiente ecuación proveída por (Budynas & Nisbett, 2015):

$$k_e = 1 - 0.08z_a = 1 - 0.08(0) = 1 \quad (21)$$

Donde  $z_a$  es la variación de transformación, siendo 0, habiendo asumido una confiabilidad del 50 % en el eje.

En este caso, no fue necesario utilizar el factor de modificación por efectos varios, por lo que se procedió a sustituir los datos previamente obtenidos en la ecuación 16, para obtener el límite de resistencia a la fatiga:

$$S_e = (0.986)(0.904)(1)(1)(1)(155MPa) = 138.28MPa \quad (22)$$

Por último, se calculó el factor de seguridad utilizando la teoría de Goodman modificada:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \rightarrow \frac{13.535MPa}{138.28MPa} + \frac{0.405MPa}{310MPa} = \frac{1}{n} \rightarrow 0.09919 = \frac{1}{n} \rightarrow n = 10.08 \quad (23)$$

Donde  $S_e$  es el límite de resistencia a la fatiga,  $\sigma_m$  es el esfuerzo medio,  $\sigma_a$  es el esfuerzo alternante, y  $S_{ut}$  es la resistencia última a la tensión del aluminio 6061.

La teoría empleada establece que un factor de seguridad mayor a 1 significa vida infinita, por lo que el eje no fallaría.

El análisis anterior se llevó a cabo sin considerar el agujero perforado en el eje, bajo la suposición de que este no reduciría el factor de seguridad por debajo de 1, siendo despreciable. Sin embargo, para verificar esto, se realizó un análisis estático estructural del eje con el

agujero utilizando el software *ANSYS Workbench*. Siguiendo el mismo procedimiento, se determinó el factor de seguridad y se comparó con los cálculos manuales.

Previo a realizar la simulación, se configuró el aluminio 6061 con las propiedades descritas en el Cuadro 7. Asimismo, se simplificó la geometría eliminando los filetes de los hombros y el punto de anclaje con el yugo, con el fin de reducir la complejidad en el mallado.

Figura 55: Eje simplificado.

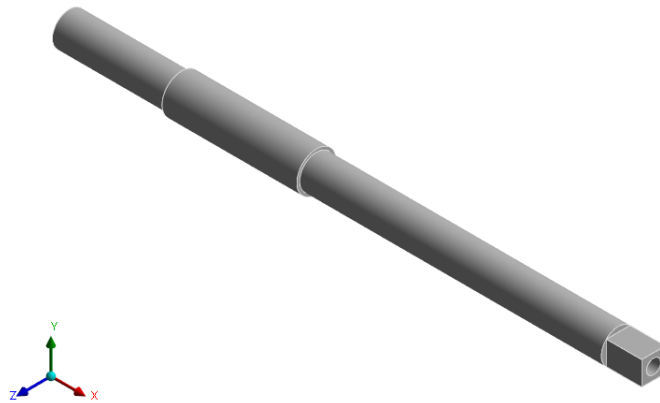


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Habiendo asignado el material, el mallado se modificó utilizando el método *Tetrahedrons* y una resolución de 4, obteniendo un promedio de calidad de 0.40 (bueno, según el Cuadro 8).

Figura 56: Mallado en eje.

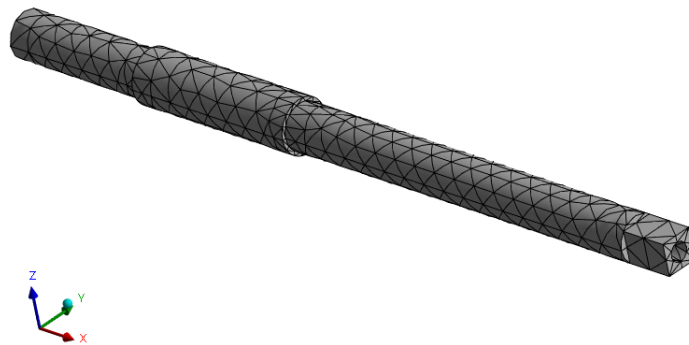


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Con tal de determinar si el eje soportaría las fuerzas aplicadas, se colocó un soporte fijo en el extremo de la primera sección, replicando un empotramiento.

Figura 57: Colocación de soporte fijo en eje.

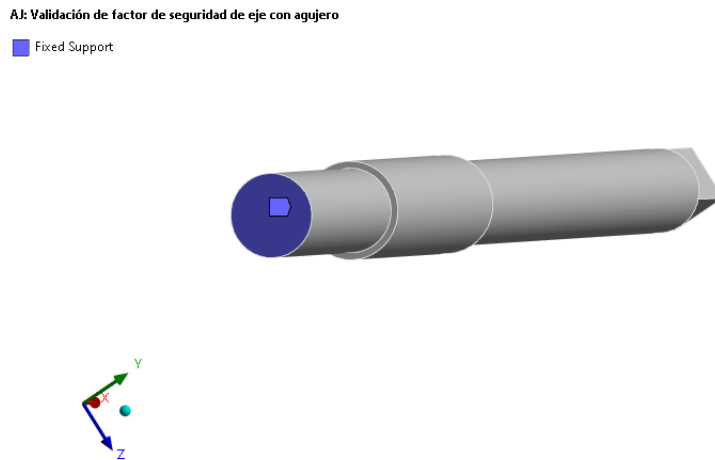


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Luego, en el punto de anclaje con el yugo, se aplicaron las siguientes cargas: el peso de 50.93 N correspondiente a las manos del piloto y el yugo, el momento de 3300 N·mm ejercido en las paredes del eje al realizar el giro, y la fuerza de empuje de 44.5 N aplicada en el agujero.

Figura 58: Colocación de fuerzas en eje.

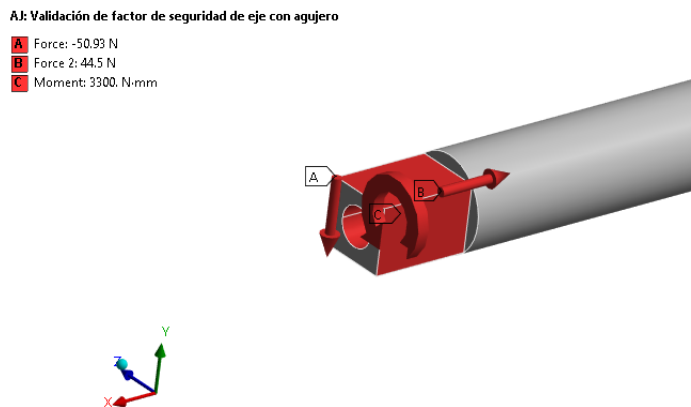


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Con lo anterior definido, se resolvió para obtener el factor de seguridad. De igual manera, se optó por calcular la deformación en los ejes x e y, con el fin de determinar si el eje sufriría deflexión.

Figura 59: Factor de seguridad mínimo de 9.998 en eje.

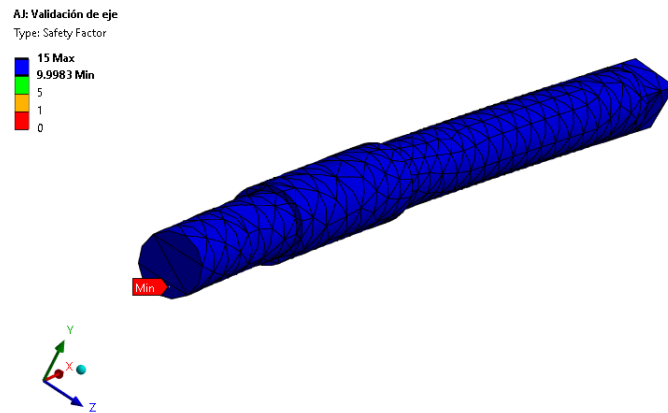


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 60: Deformación máxima en eje de 0.016 mm en dirección al eje x.

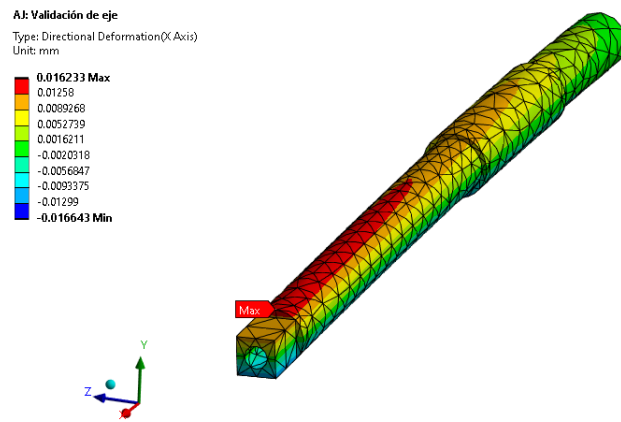


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 61: Deformación máxima en eje de  $1.037 \times 10^{-4}$  mm en dirección al eje y.

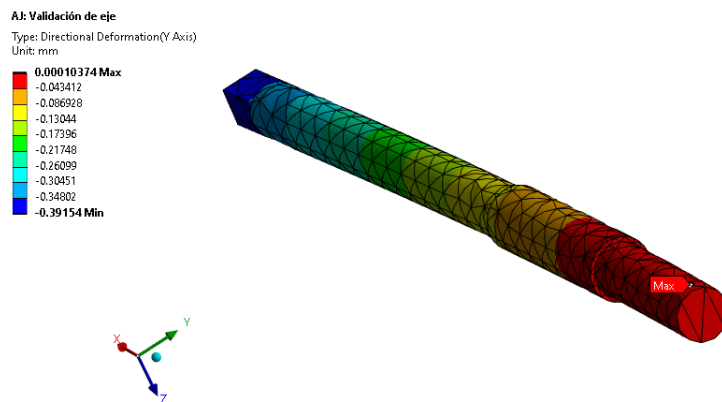


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Comparando los factores de seguridad (ecuación 23 y Figura 51), se concluyó que el agujero realizado en el eje sí fue despreciable. En cuanto a las fuerzas aplicadas, fue de suma importancia determinar cuánto esfuerzo podría soportar realmente el eje. Al realizar un proceso iterativo en una hoja de cálculo, siguiendo el mismo procedimiento que en los cálculos manuales, se determinó que el eje fallaría al aplicar las siguientes fuerzas:

- Solamente empuje o jalado: 45000 N
- Solamente giro: 145 N·m
- Esfuerzo combinado: 30000 N en empuje o jalado y 100 N·m en giro.

### Cálculos de rodamientos

Para calcular la vida nominal de los rodamientos autoalineables de bolas utilizados (NTN UC204-012), se siguió el procedimiento recomendado por el catálogo de rodamientos de la misma marca. (NTN, 2020b) indica que, para obtener esta, se necesita la carga radial equivalente dinámica del rodamiento  $P_r$ , la carga dinámica soportada por el rodamiento  $C_r$ , y las revoluciones por minuto a las que gira el eje.

La carga radial dinámica equivalente del rodamiento se calculó de la siguiente manera:

$$P_r = XF_r + YF_a \quad (24)$$

Donde  $F_a$  es la fuerza de empuje o jalado,  $F_r$  es la reacción del rodamiento en el punto crítico del eje,  $X$  es el primer factor de carga axial, e  $Y$  es el segundo factor de carga axial.

La reacción fue obtenida mediante una sumatoria de momentos basada en la figuras 45 y 46:

$$\sum M_A = 0 \quad (25)$$

$$R_B(155.2mm) - (50.93N)(310.2mm) = 0 \rightarrow R_B = \frac{(50.93N)(310.2mm)}{155.2mm} = 101.8N = F_r \quad (26)$$

Donde  $W$  es el peso combinado del yugo con las manos del piloto (50.93 N) y  $R_{B(y)}$  la reacción del rodamiento en dirección al eje y.

Para lo anterior, se tomaron en cuenta las siguientes medidas del rodamiento (Figura 42):

- $S=12.7$  mm (NTN, 2020a).
- $S_1=18.3$  mm (NTN, 2020a).

Lo siguiente a obtener fueron los factores de carga axial  $X$  e  $Y$ , mediante el siguiente criterio:

Cuadro 10: Selección de factores de carga axial  $X$  e  $Y$ .

$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} \geq e$	
X	Y	X	Y
1	$Y_1$	0.65	$Y_2$

Fuente: (NTN, 2020b).

Realizando lo siguiente:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{44.5N}{101.8N} = 0.437 \quad (27)$$

Donde  $F_a$  es la fuerza de empuje o jalado de 44.5 N, y  $F_r$  el valor de la reacción del rodamiento en el punto crítico, obtenido en la ecuación 26.

El catálogo no contaba con los valores de la constante  $e$  para el rodamiento utilizado (diámetro interno de 19.05 mm y diámetro externo de 47 mm). Se realizó una interpolación utilizando los valores para diámetros internos de 17 mm y 20 mm, ambos con diámetro externo de 47 mm, para obtener el valor adecuado para este caso.

Cuadro 11: Valores de constante  $e$  para diámetros internos de 17 mm y 20 mm, ambos con diámetro externo de 47 mm.

	Valores de constante $e$	
	d = 17 mm	d = 20 mm
	0.32	0.29
	0.51	0.50
Promedio	0.415	0.395

Fuente: (NTN, 2020b).

Realizando la interpolación, se obtuvo un valor de 0.401 para el diámetro interno de 19.05 mm. Observando el cuadro 10 y el resultado de la ecuación 27,  $\frac{F_a}{F_r} \geq e$ , por lo que se utilizó 0.65 en el primer factor de carga axial. Para obtener el faltante, se utilizó el mismo procedimiento que en los valores de constante  $e$ .

Cuadro 12: Valores de carga axial  $Y_2$  para diámetros internos de 17 mm y 20 mm, ambos con diámetro externo de 47 mm.

	Valores de carga axial $Y_2$	
	d = 17 mm	d = 20 mm
	3.10	3.40
	1.90	2.10
Promedio	2.5	2.75

Fuente: (NTN, 2020b).

Interpolando, se obtuvo un valor de 2.67 para el diámetro interno de 19.05 mm. Con esto, se pudo calcular la carga radial dinámica equivalente del rodamiento:

$$P_r = XF_r + YF_a = (0.65)(101.8N) + (22.67)(44.5N) = 184.98N \quad (28)$$

Donde  $F_r$  es la reacción del rodamiento en el punto crítico obtenido en la ecuación 26,  $F_a$  la fuerza de empuje o jalado de 44.5 N,  $X$  el primer factor de carga axial con un valor de 0.65, e  $Y$  el segundo factor de carga axial con un valor de 22.67.

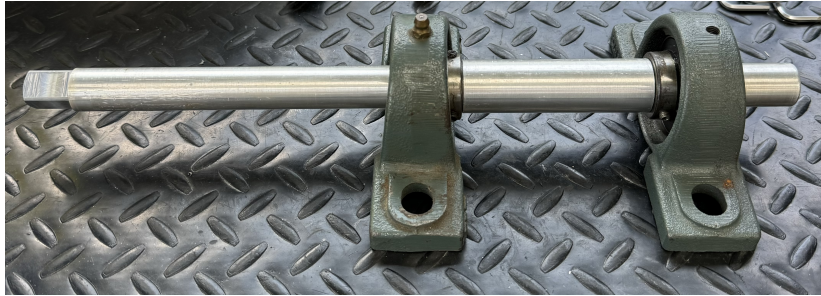
Por último, se calculó la vida nominal de los rodamientos:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot rpm} \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^3 = \frac{10^6}{(60)(100rpm)} \left(\frac{12800N}{184.8N}\right)^3 = 552199444512h \quad (29)$$

Donde  $rpm$  son las 50 rpm asumidas a las que giraría el eje,  $C_r$  es la carga dinámica soportada por el rodamiento, indicada por (NTN, 2020b), y  $P_r$  es la carga radial dinámica equivalente del rodamiento, obtenida en la ecuación 28.

Habiendo comprobado que las piezas soportarían los esfuerzos aplicados, el eje fue maquinado con el equipo proporcionado en el laboratorio de máquinas herramientas de la universidad, para luego verificar que las chumaceras encajaran correctamente en él.

Figura 62: Eje maquinado con chumaceras.



Fuente: Elaboración propia.

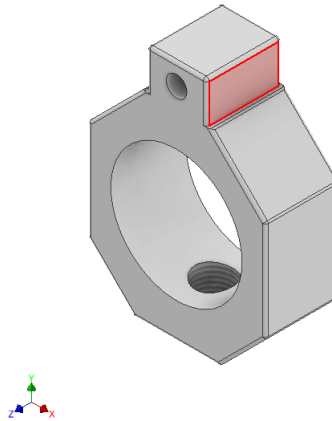
## 6.5. Tope de eje y conexión de resortes

Buscando limitar el giro del yugo a  $90^\circ$  en cada dirección, se diseñó un mecanismo de tope. Se determinó que el lugar más apropiado para colocarlo sería el eje, ya que no habría una manera práctica de hacerlo en el yugo. De igual forma, dado que el eje debía estar conectado a los resortes para generar la retroalimentación de fuerza en giro, se buscó la manera de integrar ambas funciones en una misma pieza: el tope y el conector de resortes al eje.

### 6.5.1. Diseño

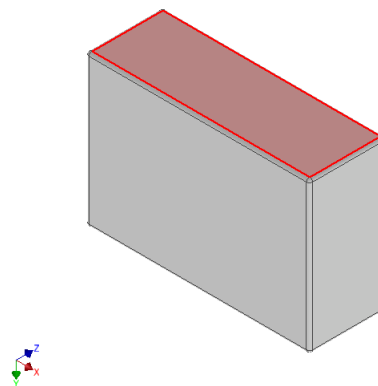
El mecanismo de tope consiste de tres piezas: el conector central y dos placas de contacto, todas fabricadas con aluminio 6061.

Figura 63: Conector central.



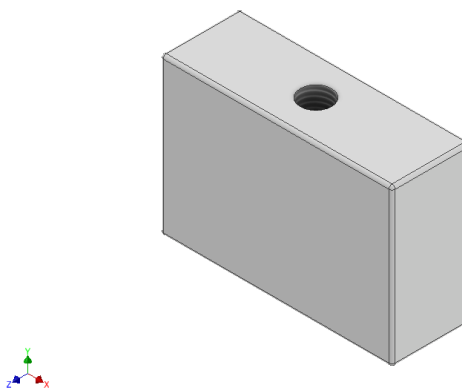
Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 64: Placas de contacto (vista isométrica superior).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 65: Placas de contacto (vista isométrica inferior).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Observando la Figura 55, el conector central fue diseñado con una base de 30 mm, altura de 50 mm, profundidad de 12.7 mm y 4 cortes a 45°. Contando con 3 agujeros, el principal tiene un diámetro de 22.225 mm, ya que estará colocado verticalmente en la segunda sección del eje (Figura 41). El segundo agujero, en el centro de la sección inferior de la pieza, fue diseñado para colocar una castigadera de 1/4 de pulgada, fijando la pieza al eje y restringiendo cualquier tipo de movimiento. El último agujero, ubicado en la parte superior, tiene 3.5 mm de diámetro para colocar el agarrador de los resortes, ya que estos fueron colocados en las paredes paralelas al eje. Se añadieron filetes de 0.5 mm a lo largo de la geometría para eliminar cualquier borde filoso.

Las placas de contacto (figuras 56 y 57) fueron diseñadas con una geometría rectangular de 37 mm de base, 25 mm de altura y 12.7 mm de profundidad. Estas contaron solamente con un agujero de 5 mm de diámetro en el centro de la cara inferior, en el cual se utilizaría un tornillo M5 para fijarlas a la base. Al igual que en el conector central, se añadieron filetes de 0.5 mm para eliminar todos los bordes que pudieran ser filosos.

Las áreas resaltadas en rojo de las figuras 55 y 56 identifican las áreas de contacto o áreas de tope entre las piezas. Con el conector central posicionado en el eje, las placas fueron colocadas en la base de manera que sus bordes quedaran a 18.5 mm del centro del agujero principal del conector. De esta forma, al girar el eje y entrar en contacto las dos piezas, se limitaría el giro del yugo a exactamente 90° en cada dirección, mientras que se tensarían los resortes para obtener la retroalimentación de fuerza. Los cortes a 45° en el conector central permitieron que este pudiera girar 180° sin que los extremos de su geometría entraran en contacto con las placas de contacto.

Figura 66: Funcionamiento de mecanismo de tope a 90°.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

### 6.5.2. Cálculos de conector central por medio de análisis estático estructural en software

Dado que el conector central tenía una geometría compleja y era propenso a fallar debido a los esfuerzos generados por el contacto con las placas y la fuerza de los resortes, se analizó mediante una simulación en el software de análisis *ANSYS Workbench*. Como en las simulaciones realizadas anteriormente, el primer paso fue crear el material utilizando las propiedades mecánicas del aluminio 6061 (Cuadro 7). Luego, se simplificó la geometría, eliminando los filetes realizados para evitar complicaciones en el mallado de la pieza.

Figura 67: Conector central simplificado.

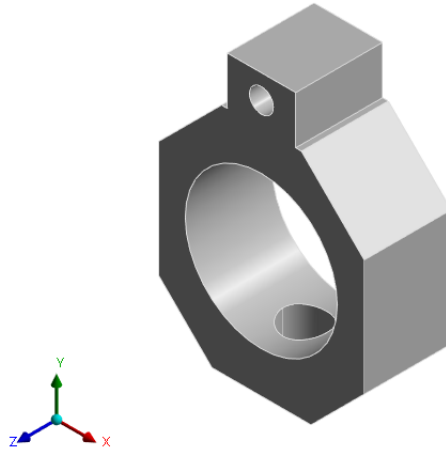


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Luego de asignar el material, se modificó el mallado mediante el método *Patch Conforming* y una resolución de 4, obteniendo un promedio de calidad de 0.31 (bueno, según el Cuadro 8).

Figura 68: Mallado en conector central.

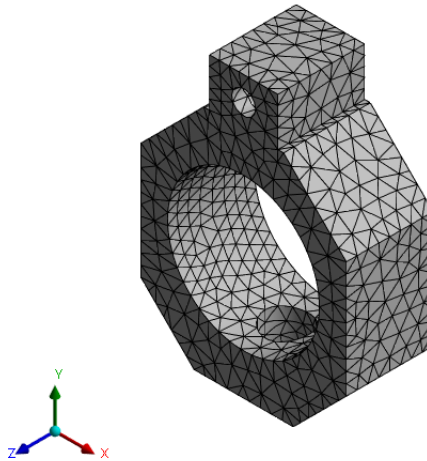


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Se colocó un soporte fijo en el agujero donde se enroscaría la castigadera, fijando así el conector al eje y eliminando cualquier tipo de movimiento.

Figura 69: Colocación de soporte fijo en conector central.

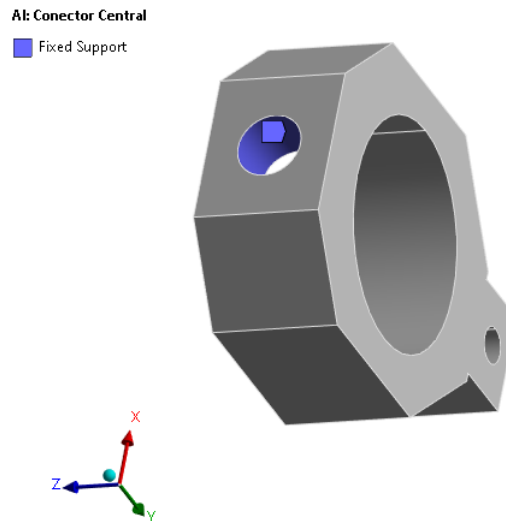


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Sabiendo que se ejercería una fuerza de jalado de 22 N en el agujero superior al realizar el giro, se aplicó esta fuerza en dirección al eje x negativo. De igual forma, como la pieza entraría en contacto con las placas al alcanzar  $90^\circ$  de rotación, se asumió una fuerza de 200 N para simular un posible esfuerzo grande que el usuario podría haber realizado al llegar a este punto. Por ende, esta fuerza también fue colocada en dirección al eje x negativo.

Figura 70: Colocación de fuerzas en conector central.

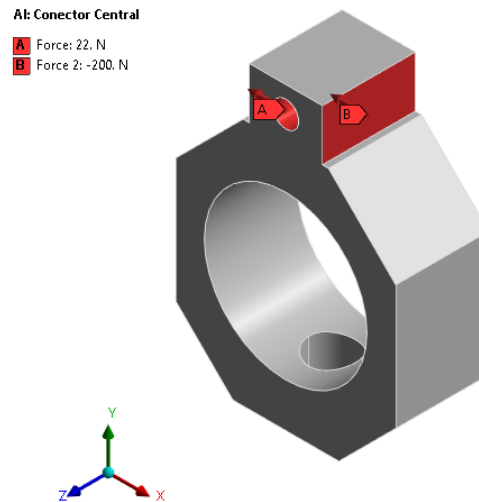


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Con lo anterior, se resolvió para obtener el factor de seguridad de la pieza.

Figura 71: Factor de seguridad de 4.07 en conector central.

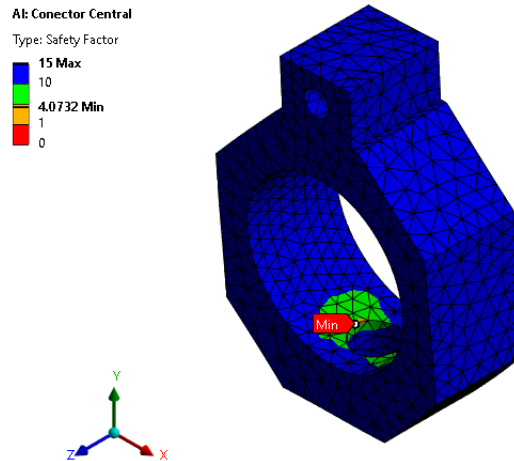


Imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Dado que el conector principal tenía una geometría con varios puntos críticos y un factor de seguridad de 4.07, no se analizaron las placas de contacto, ya que tenían una geometría más simple y robusta. Por lo tanto, si el conector no fallaba, se asumió que las placas tampoco lo harían.

Teniendo certeza de que las piezas cumplían con los requerimientos establecidos, se fabricaron en el laboratorio de máquinas herramientas de la universidad.

Figura 72: Conector central maquinado.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 73: Placas de contacto maquinadas.

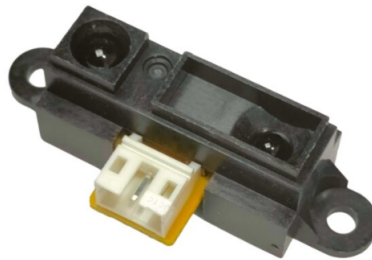


Fuente: Elaboración propia.

## 6.6. Sistema de medición

Con el módulo en funcionamiento, las mediciones a tomar fueron el desplazamiento longitudinal y los grados de giro del yugo, para poder comunicarlas a la interfaz y replicarlas en la simulación. El desplazamiento se midió con un sensor de distancia Sharp GP2Y0A21YK0F, y los grados de giro se midieron con un potenciómetro de 10 kOhms con un rango de 180°.

Figura 74: Sensor de distancia Sharp GP2Y0A21YK0F.



Fuente: (Tettsa, 2024b).

Figura 75: Potenciómetro de 10 kilo ohm con giro de 180°.

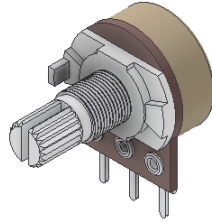


Fuente: (Tettsa, 2024a).

Los modelos 3D utilizados para el potenciómetro y sensor de distancia fueron brindados

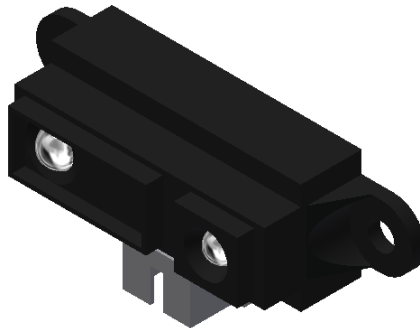
por Oleksandr Velykyi y Emad, respectivamente:

Figura 76: Potenciómetro 3D.



Fuente: (Oleksandr, [2023](#)). Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 77: Sensor de distancia 3D.

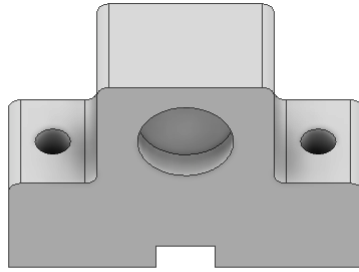


Fuente: (Emad, [2012](#)). Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

### 6.6.1. Diseño de piezas

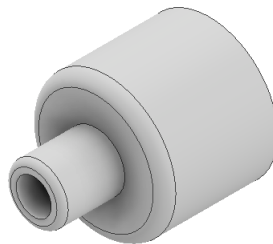
El potenciómetro debió ser anclado al extremo de la primera sección del eje, ya que, al girar este, la perilla del potenciómetro giraría simultáneamente. El mecanismo de tope diseñado fue beneficioso para esto, pues impidió que el potenciómetro superara su límite de giro y se rompiera. Para lograrlo, se diseñaron dos piezas para imprimir en 3D con material PETG: la base para el potenciómetro y el conector del eje a la perilla del potenciómetro.

Figura 78: Base para potenciómetro.



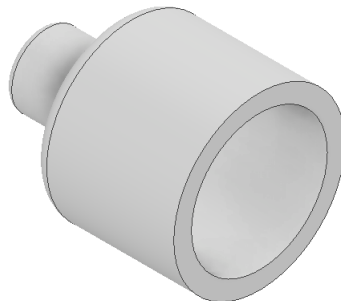
Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 79: Conector del eje a perilla del potenciómetro (vista isométrica frontal).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 80: Conector del eje a perilla del potenciómetro (vista isométrica posterior).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Observando la Figura 70, la base para el potenciómetro fue diseñada con una base de 60 mm, altura de 43 mm y profundidad de 20 mm. Incluyó un agujero principal de 16.3 mm de diámetro y 5 mm de profundidad para ingresar la base circular del potenciómetro, quedando ajustado a presión. La profundidad del agujero aseguró que, al estar colocado el potenciómetro, los pines de conexión sobresalieran lo suficiente para conectar los cables sin interferencia. Se incluyó un orificio rectangular de 10 mm de base y 5 mm de altura que atravesó la pieza, por el cual se ingresarían los cables de conexión y saldrían por la parte posterior. Los dos agujeros restantes fueron para fijación a la base, cada uno con un diámetro de 6 mm para utilizar tornillos M5. Por último, se colocaron filetes de 2 mm a lo largo de la geometría para proporcionar una mejor estética y eliminar bordes o superficies punzantes.

El conector del eje a la perilla del potenciómetro (figuras 71 y 72) fue diseñado con dos extrusiones circulares: la primera, con diámetro interno de 19.250 mm, diámetro externo de 24.250 mm y profundidad de 15 mm, encajó a presión con el eje. La segunda extrusión, realizada sobre la primera, encajó a presión con la perilla del potenciómetro; tuvo un diámetro interno de 6.2 mm, diámetro externo de 10.2 mm y profundidad de 8 mm. Además, se agregaron filetes de 2 mm para mejorar la estética de la pieza.

### 6.6.2. Posición de sensor de distancia

El sensor de distancia utilizado (Figura 66) puede realizar mediciones precisas a objetos situados entre 10 y 80 cm de distancia (Tettsa, 2024b). Este sensor se colocó en la pared posterior de la base primaria utilizando dos tornillos M3 con sus respectivas tuercas, a la misma altura y posición que la base del potenciómetro. Este componente fue seleccionado para medir el desplazamiento.

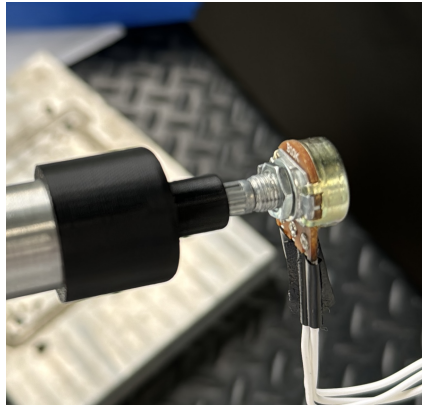
### 6.6.3. Impresión

Se determinó que la impresora 3D utilizada proporcionaba uniones a presión satisfactorias al agregar 0.2 mm a las dimensiones originales de las piezas, aunque esto puede variar según la impresora utilizada. Por ejemplo, el extremo del eje donde se colocó el conector mide 19.05 mm, por lo que se diseñó un diámetro interno de 19.250 mm en la primera extrusión de la pieza. Al imprimir las piezas, los ajustes de importancia que se editaron en el software de impresión fueron los siguientes:

- Material: PETG
- Porcentaje de relleno: 15 %
- Patrón de relleno: *Grid*
- Estructura de soporte: *Tree*
- Ángulo máximo para soportes: 60°

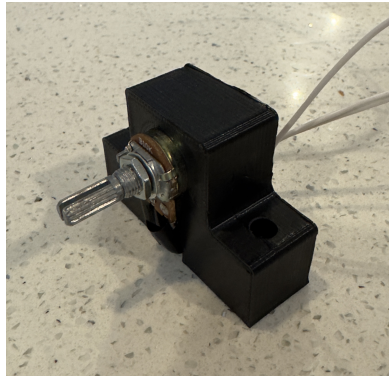
Dado que ninguna de las piezas estaba sometida a esfuerzos, fueron impresas sin previo análisis.

Figura 81: Conector del eje a perilla del potenciómetro en posición de funcionamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 82: Potenciómetro colocado en su base.



Fuente: Elaboración propia.

## 6.7. Correderas

Para generar el desplazamiento en empuje y jalado, se utilizaron dos pares de correderas de rodillos prefabricadas de la serie 1805T WH450, con una longitud de 450 mm. Dado que estas correderas soportan el peso de la base secundaria y sus componentes, que suman 5 lb, no se analizó su resistencia, ya que el fabricante indica que pueden soportar hasta 75 lb. (Knape & Vogt, 2024).

Figura 83: Correderas.



Fuente: (Knape & Vogt, 2024).

Utilizando el software *Autodesk Inventor*, se replicó la geometría de las correderas, que tienen dimensiones generales de 450 mm de longitud, 35.5 mm de altura y 27.7 mm de profundidad al estar instaladas. También se añadieron agujeros para permitir el anclaje con tornillos M5, y se incorporaron filetes de 1 mm para hacerlas lo más parecidas posible a las reales desde el punto de vista visual.

Figura 84: Correderas diseñadas en software.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

## 6.8. Resortes

Para generar la retroalimentación de fuerza en el sistema, se utilizaron dos resortes de tensión. Con dimensiones de 8 x 10 x 34 mm y fabricados en acero inoxidable, proporcionaron las características adecuadas para cumplir su función.

Figura 85: Resortes de tensión.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 86: Resortes diseñados.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

### 6.8.1. Cálculo de constante elástica $k$

Indicando la fuerza requerida para generar la deformación en los resortes, conocer la constante elástica es de gran utilidad a la hora de utilizarlos. En este caso, la constante  $k$  fue calculada experimentalmente utilizando la Ley de Hooke:

$$F = k \cdot \Delta x \quad (30)$$

Donde  $F$  es la fuerza aplicada,  $k$  es la constante de elasticidad y  $\Delta x$  es la deformación en el eje horizontal.

Al aplicar una fuerza de 29.4 N, que provocó que el resorte se expandiera a 51.5 mm, se despejó para calcular la constante elástica:

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{29.4N}{51.5mm - 34mm} = \frac{29.4N}{17.5mm} = 1.68N/mm \quad (31)$$

### 6.8.2. Cálculo de fuerza retroalimentada

Por medio de la misma ley, se determinó la magnitud de expansión que debían alcanzar los resortes para lograr la fuerza de retroalimentación deseada.

$$F = k \cdot x \quad (32)$$

Donde  $F$  es la fuerza retroalimentada por el resorte,  $k$  es la constante de elasticidad y  $x$  es la distancia recorrida por el mismo.

Sabiendo que el sistema cuenta con dos resortes, se realizó el cálculo para el jalado y empuje:

$$F = 1.68N/mm \cdot 13.24mm = 22.25N \cdot 2 = 44.5N \quad (33)$$

Se realizó lo mismo para el giro:

$$F = 1.68N/mm \cdot 6.7mm = 11.25N \cdot 2 = 22.5N \quad (34)$$

## 6.9. Sujetadores de resortes

Se sabe que los resortes fueron anclados al conector central del mecanismo de tope. Para generar la retroalimentación de fuerza en giro y desplazamiento, también se anclaron a las paredes laterales de la base principal de la estructura (Figura 81). Esto se realizó mediante dos pernos de anclaje prefabricados, diseñados con las dimensiones de los reales: diámetro de 1/4" y longitud de 4".

Figura 87: Sujetadores de resortes.



Fuente: (Cemaco, 2024).

Figura 88: Sujetadores de resortes diseñados.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

## 6.10. Estructura y material

El sistema contó con dos bases de madera de pino para formar la estructura donde se colocaron el yugo y sus componentes. Una base primaria y otra secundaria fueron utilizadas, siendo la primaria compuesta por dos paredes laterales y una posterior de madera de pino. Ambas bases contaron con los agujeros necesarios para realizar la totalidad de los anclajes. En el caso de las uniones atornilladas entre maderas, los agujeros realizados evitaron que, al atornillar los tornillos, la madera se expandiera y rajara.

Siendo el pino una de las maderas utilizadas, se tomó como referencia el *Pinus oocarpa*, uno de los tipos más vendidos en la región. En el manual de estándar europeo EN 1912 sobre

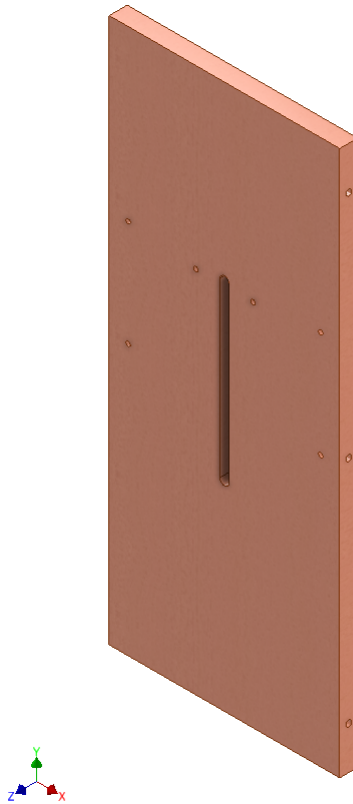
clases de esfuerzo y asignación de grados visuales a especies de madera, se indica que este tiene una clase de esfuerzo C24 (CEN, 2012). Con esta información, en el manual de estándar europeo EN 338 sobre las propiedades en cada clase de esfuerzo de la madera estructural, se determinó el siguiente valor de esfuerzo a flexión para el pino seleccionado:

- Flexión ( $f_{m,k}$ ) = 24 MPa (CEN, 2016).

### 6.10.1. Base primaria de pino

Soportando la base secundaria y sus componentes, la base primaria fue diseñada y fabricada con una base de 243 mm, longitud de 575 mm y espesor de 19.05 mm. Cuatro agujeros en la cara frontal correspondieron al anclaje de los soportes para las correderas, mientras que dos fueron destinados al anclaje del sistema de yugo a la estructura del simulador de vuelo. La ranura colocada sirvió para que los cables del potenciómetro no crearan interferencia durante el movimiento de empuje y jalado. En cuanto a la cara inferior, se colocó un agujero para el anclaje entre la base y la pared posterior. Por último, cada cara lateral contó con tres agujeros, correspondientes al atornillado a las paredes laterales. Esta base fue unida a la estructura principal del simulador, colocada de manera que no sufrió flexión.

Figura 89: Base primaria.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

## Paredes laterales de pino

Las paredes laterales contaron con una base de 575 mm, una altura de 130 mm y una profundidad de 19.05 mm. En cada una se realizaron cinco agujeros: uno para colocar los pernos de anclaje que sujetaron los resortes, otro para la unión atornillada con la pared posterior y tres para la unión atornillada con las paredes laterales.

Figura 90: Paredes laterales.

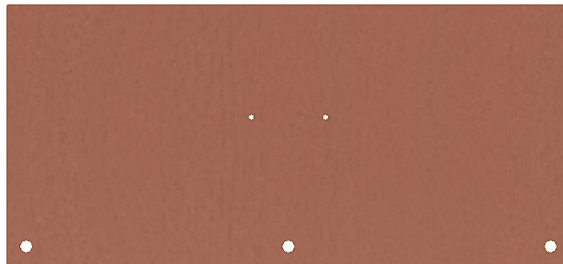


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

## Pared posterior de pino

Por último, contando con base de 281.10 mm, altura de 130.035 mm y espesor de 19.05 mm, la pared posterior contó con cinco agujeros: 3 para la unión atornillada a la base primaria y dos para el colocamiento del sensor de distancia.

Figura 91: Pared posterior.



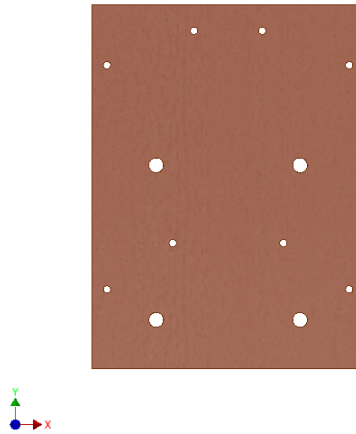
Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

## 6.10.2. Base secundaria de pino

### Diseño

Soportando esta base diversos componentes, contó con doce agujeros para sus anclajes: cuatro para las chumaceras, dos para las placas de contacto, dos para la base del potenciómetro y cuatro para las correderas. La base fue diseñada con una base de 180 mm, una altura de 240 mm y espesor de 19.05 mm.

Figura 92: Base secundaria.

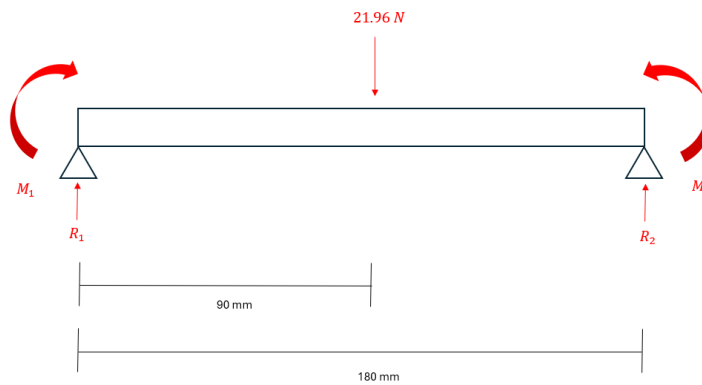


Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

### Cálculo de factor de seguridad por esfuerzo a flexión

Soportando diversos componentes y no teniendo las correderas ancladas en el centro de la base, esta sufrió esfuerzo de flexión. Por ende, se optó por calcular el factor de seguridad para comprobar que la base pudiera soportar dicho esfuerzo.

Figura 93: Diagrama de cuerpo libre de base secundaria.



Fuente: Elaboración propia.

El peso total de los componentes mencionados fue de 21.96 N. Dado que la base estaba empotrada en sus extremos debido a las correderas, se calcularon las reacciones por medio de la siguiente ecuación:

$$R_1 = R_2 = \frac{Fb^2}{L^2}(4b) = \frac{(21.96N)(90mm)^2}{(180mm)^3}(4(90mm)) = 10.98N \quad (35)$$

Donde  $F$  es la fuerza causada por los componentes de 21.96 N,  $b$  la mitad de la distancia de la base de 90 mm, y  $L$  la distancia total de la base de 180 mm.

Sabiendo que ambos momentos generan el mismo, se calcularon de la siguiente forma:

$$M_1 = M_2 = \frac{Fb^3}{L^2} = \frac{(21.96N)(90mm)^3}{(180mm)^2} = 0.49Nm \quad (36)$$

Donde  $F$  es la fuerza causada por los componentes de 21.96 N,  $b$  la mitad de la distancia de la base de 90 mm, y  $L$  la distancia total de la base de 180 mm.

El esfuerzo ejercido fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{(0.49Nm)(0.0095m)}{\frac{1}{12}(0.18m)(0.0195m)^3} = 41852.8(1.5)Pa = 62778Pa = 0.062MPa \quad (37)$$

Donde  $M$  es el momento resultante de la ecuación 31,  $I$  el momento de inercia utilizando la distancia total de la base ( $L$ ) de 0.18 m y el espesor de la misma ( $h$ ) de 0.0195 m, y  $c$  es el centroide de la base, de 0.0095 m. Según el Eurocódigo 5, por razones de seguridad, se deben aumentar las cargas utilizadas: si las cargas son vivas (dinámicas), deben multiplicarse por 1.5, que es el caso en esta situación. (Porteous & Kermani, 2013).

Para calcular la flexión en la madera, se realizó lo siguiente:

$$f_{m,y} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{(0.9)(24MPa)}{1.3} = 16.62MPa \quad (38)$$

Donde  $k_{mod}$  es el factor de duración de carga, dependiendo de la clase de servicio de la madera. Según el Eurocódigo 5, en este caso, el pino utilizado tiene clase de servicio 1, y la carga se aplica durante duraciones cortas, por lo que se utilizó un factor de 0.9.  $\gamma_m$  es el coeficiente parcial para las propiedades de la madera, donde se utilizó 1.3 por ser madera sólida (Porteous & Kermani, 2013). Por último,  $f_{m,k}$  es el factor de esfuerzo a flexión definido anteriormente.

Luego, se calculó el factor de seguridad:

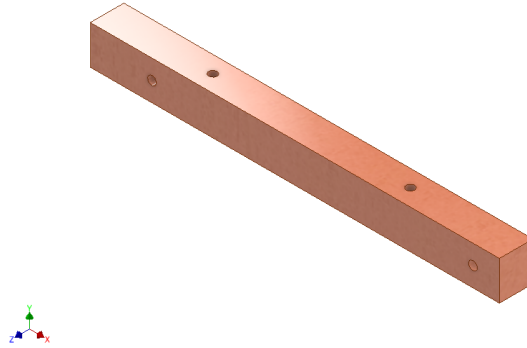
$$n = \frac{f_{m,y}}{\sigma} = \frac{16.62MPa}{0.062MPa} = 268 \quad (39)$$

Donde  $f_{m,y}$  es la flexión resultante en la ecuación 33, y  $\sigma$  es el esfuerzo obtenido de la ecuación 32.

### 6.10.3. Soportes de pino para correderas

Como se mencionó anteriormente, las correderas fueron unidas directamente a la base secundaria. Para fijarlas a la base primaria, se utilizaron dos soportes de madera de pino con una base de 232 mm, una altura de 22 mm y una profundidad de 19.05 mm. En cada soporte se realizaron cuatro agujeros: dos en la cara frontal para anclar las correderas, y los otros dos en la cara superior para la unión atornillada entre los soportes y la base primaria.

Figura 94: Soportes de pino para correderas.



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

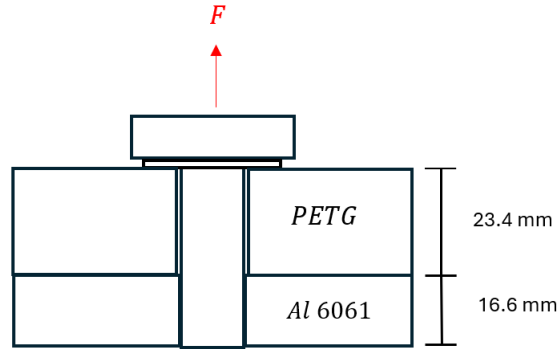
## 6.11. Uniones no permanentes

Se diseñaron uniones no permanentes para la totalidad del módulo, permitiendo su ensamblaje y desensamblaje fáciles. Esto facilita el transporte y almacenamiento del módulo. Las uniones se realizaron mediante tornillos, tuercas y arandelas, y se dieron entre componentes, entre componentes y bases, y entre bases. A continuación, se incluye el análisis de la unión más crítica en cada caso de esfuerzo: tensión, compresión y corte de tornillos, aplastamiento de la madera por corte y aplastamiento de la madera por extracción. Al cumplir cada una de estas con el factor de seguridad requerido, se aseguró que las demás del mismo tipo también lo cumplirían, por lo que no se incluyeron en el análisis. Esto evitó una saturación de cálculos en la sección, incluyendo solamente los necesarios para entender el procedimiento realizado.

### 6.11.1. Esfuerzo de fatiga a tensión (unión atornillada entre yugo y eje)

El yugo y el eje fueron unidos mediante un tornillo M8 de grado 8.8. Este tornillo se insertó por la cara frontal del yugo y se enroscó en el eje hasta que las dos piezas estuvieran completamente unidas en la entrada diseñada para ello (Figura 9). El tornillo fue analizado por fatiga a tensión, considerando una carga de 44.5 N durante el jalado y empuje.

Figura 95: Unión atornillada entre el yugo y eje.



Fuente: Elaboración propia.

Primero, se definieron las propiedades del tornillo requeridas para el análisis:

- Resistencia última a tensión ( $S_{ut}$ ) = 700 MPa (Budynas & Nisbett, 2015).
- Resistencia de prueba mínima ( $S_p$ ) = 600 MPa (Budynas & Nisbett, 2015).
- Límite de resistencia a la fatiga ( $S_e$ ) = 129 MPa (Budynas & Nisbett, 2015).
- Área de esfuerzo de tensión ( $A_t$ ) = 36.6 mm<sup>2</sup> (Budynas & Nisbett, 2015).
- Diámetro mayor nominal ( $d$ ) = 8 mm (Budynas & Nisbett, 2015).

Se especificaron los módulos de elasticidad del PETG, aluminio 6061 y acero:

- $E_{PETG}$  = 0.565 GPa (cuadro 6).
- $E_{Al}$  = 68.9 GPa (cuadro 6).
- $E_{Acero}$  = 200 GPa (Budynas & Nisbett, 2015).

Se calculó la longitud del tornillo, considerando que se utilizó una arandela y que el espesor del aluminio roscado es mayor que el diámetro nominal del tornillo:

$$L = h + \frac{d}{2} = 23.4mm + \left(\frac{8mm}{2}\right) = 27.4mm \quad (40)$$

Donde  $d$  es el diámetro nominal del tornillo, que es de 8 mm, y  $h$  es el espesor del PETG atravesado, que es de 23.4 mm.

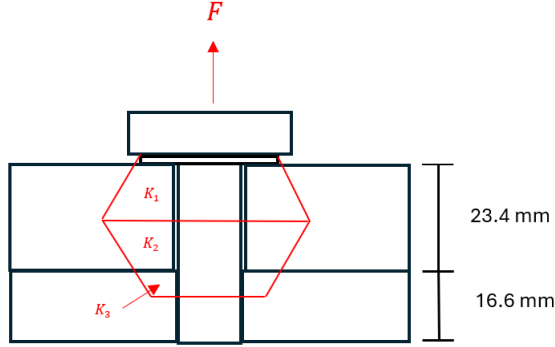
Para calcular la rigidez efectiva del tornillo, se hizo lo siguiente:

$$k_b = \frac{A_t E_{Acero}}{L} = \frac{(36.6mm^2)(200000N/mm^2)}{27.4mm} = 267.15 \times 10^6 N/m \quad (41)$$

Donde  $A_t$  es el área de esfuerzo de tensión,  $E_{Acero}$  es el módulo de elasticidad del acero, y  $L$  la longitud del tornillo obtenida en la ecuación 35.

Habiendo dos materiales incluidos en el agarre del tornillo, se asumió que juntos actuaban como resortes en serie, por lo que se consideraron como un conjunto de conos.

Figura 96: Conos en unión atornillada entre el yugo y eje.



Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la razón de resorte del primer tronco:

$$k_1 = \frac{0.5774\pi Ed}{\ln \frac{(1.155t+D-d)(D+d)}{(1.55t+D+d)(D-d)}} = \frac{(0.5774)(\pi)(68.9 \times 10^9 Pa)(0.008m)}{\ln \frac{(1.155(0.0137m)+(0.0120m-0.008m)(0.0137m+0.008m)}{(1.155(0.0137m)+0.0120m+0.008)(0.0120m-0.008m)}} = 9.84 \times 10^8 N/m \quad (42)$$

Donde  $t$  es la distancia de 0.0137 m,  $d$  es el diámetro mayor nominal del tornillo,  $D$  es el diámetro exterior del tronco de 0.0120 m, y  $E_{Al}$  es el módulo de elasticidad del aluminio 6061.

En cuanto a la razón de resorte del segundo tronco:

$$k_2 = \frac{0.5774\pi Ed}{\ln \frac{(1.155t+D-d)(D+d)}{(1.55t+D+d)(D-d)}} = \frac{(0.5774)(\pi)(68.9 \times 10^9 Pa)(0.008m)}{\ln \frac{(1.155(0.0097m)+(0.0166m-0.008m)(0.0166m+0.008m)}{(1.155(0.0097m)+0.0166m+0.008)(0.0166m-0.008m)}} = 2.18 \times 10^9 N/m \quad (43)$$

Donde  $t$  es la distancia de 0.0097 m,  $d$  es el diámetro mayor nominal del tornillo,  $D$  es el diámetro exterior del tronco de 0.0166 m, y  $E_{Al}$  es el módulo de elasticidad del aluminio 6061.

Por último, se calculó la razón de resorte del tercer tronco:

$$k_3 = \frac{0.5774\pi Ed}{\ln \frac{(1.155t+D-d)(D+d)}{(1.55t+D+d)(D-d)}} = \frac{(0.5774)(\pi)(5.65 \times 10^8 Pa)(0.008m)}{\ln \frac{(1.155(0.004m)+(0.0127m-0.008m)(0.0127m+0.008m)}{(1.155(0.004m)+0.0127m+0.008)(0.0127m-0.008m)}} = 1.70 \times 10^7 N/m \quad (44)$$

Donde  $t$  es la distancia de 0.004 m,  $d$  es el diámetro mayor nominal del tornillo,  $D$  es el diámetro exterior del tronco de 0.0127 m, y  $E_{PETG}$  es el módulo de elasticidad del PETG.

Teniendo las tres razones, actuando estas como resortes en serie, se pudo calcular la relación del resorte total de los elementos:

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}} = \frac{1}{\frac{1}{9.84 \times 10^8 N/m} + \frac{1}{2.18 \times 10^9 N/m} + \frac{1}{1.70 \times 10^7 N/m}} = 1.65 \times 10^7 N/m \quad (45)$$

Donde  $k_1$  es la razón de resorte del primer tronco,  $k_2$  es la razón de resorte del segundo tronco, y  $k_3$  es la razón de resorte del tercer tronco.

Siguiente, se calculó la constante de la rigidez de la unión:

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} = \frac{267.15 \times 10^6 N/m}{267.15 \times 10^6 N/m + 1.65 \times 10^7 N/m} = 0.94 \quad (46)$$

Donde  $k_b$  es el resultado de la rigidez efectiva del tornillo en la zona de sujeción obtenido en la ecuación 36 y  $k_m$  la relación de resorte total de los elementos resultante de la ecuación 40.

Para encontrar la precarga recomendada, se consideró que la unión sería no permanente, dado que el yugo y sus componentes podrían ser ensamblados y desensamblados:

$$F_i = 0.75(A_t)(S_p) = 0.75(36.6 \text{ mm}^2)(600 \text{ N/mm}^2) = 16470 \text{ N} \quad (47)$$

Donde 0.75 es el factor indicado por (Budynas & Nisbett, 2015),  $A_t$  es el área de esfuerzo de tensión del tornillo, y  $S_p$  la resistencia de prueba mínima de 600 MPa.

Con los resultados obtenidos anteriormente y las variables ya definidas, se determinó el factor de seguridad del tornillo mediante la teoría de Goodman:

$$n_f = \frac{2S_e(S_{ut}A_t - F_i)}{CP(S_{ut} + S_e)} = \frac{2(129 \text{ MPa})((700 \text{ MPa})(36.6 \text{ mm}^2) - 16470 \text{ N})}{(0.94)(44.5 \text{ N})(700 \text{ MPa} + 129 \text{ MPa})} = 68 \quad (48)$$

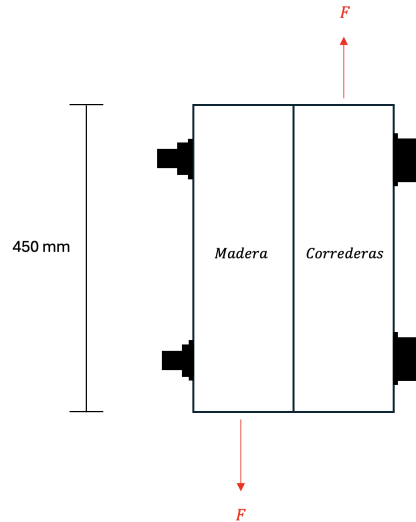
Donde  $S_e$  es el límite de resistencia a la fatiga del tornillo,  $S_{ut}$  la resistencia última a tensión del tornillo,  $A_t$  es el área de esfuerzo de tensión del tornillo,  $F_i$  es la precarga recomendada calculada en la ecuación 42,  $C$  es la constante de rigidez de la unión, y  $P$  es la carga aplicada de 44.5 N.

### 6.11.2. Esfuerzo cortante directo (unión pernada entre correderas y madera)

Ambas correderas fueron ancladas a la base primaria mediante un soporte de madera y dos tornillos M5 de grado 8.8 en cada una. Los tornillos atravesarían la corredera, pasarían por la madera y finalmente serían fijados con una tuerca y una arandela. Dado que la fuerza

aplicada en estos tornillos es de 44.5 N durante el jalado y empuje del yugo, y la madera ejerce una fuerza igual en sentido opuesto, se analizaron por esfuerzo cortante directo.

Figura 97: Unión pernada entre correderas y soporte de madera en base primaria.



Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades del tornillo a utilizar fueron las siguientes:

- Resistencia de prueba mínima ( $S_p$ ) = 600 MPa (Budynas & Nisbett, 2015).
- Área de esfuerzo de tensión del tornillo ( $A_t$ ) = 14.2 mm<sup>2</sup> (Budynas & Nisbett, 2015).

Se calculó el esfuerzo cortante, tomando en cuenta que se utilizaron 4 tornillos en total:

$$\tau = \frac{F}{4A_t} = \frac{44.5N}{(4)(14.5mm^2)} = 0.77MPa \quad (49)$$

Donde  $F$  es la fuerza ejercida de 44.5 N, y  $A_t$  es el área de esfuerzo de tensión del tornillo.

El factor de seguridad de los tornillos fue obtenido de la siguiente forma:

$$n_d = \frac{0.557S_p}{\tau} = \frac{(0.557)(600MPa)}{0.77MPa} = 434 \quad (50)$$

Donde  $S_p$  es la resistencia mínima de prueba del tornillo y  $\tau$  es el esfuerzo cortante ejercido en el tornillo, según la ecuación 44.

Con base en el resultado obtenido, cada tornillo tiene un factor de seguridad de 108.5.

### 6.11.3. Aplastamiento de madera por esfuerzo cortante (unión entre correderas y madera)

Al observar la Figura 88, se puede apreciar que la madera ejerce una fuerza de 44.5 N en sentido opuesto al generar el movimiento en las correderas mediante el empuje y el jalado del yugo. Como consecuencia, el tornillo produce un aplastamiento de igual valor en los agujeros de la madera. Esto fue analizado para determinar si la madera podría fallar bajo estas condiciones.

Primero, se calculó el esfuerzo generado en el agujero, considerando que se utilizaron un total de 4 tornillos y que, por seguridad, las cargas deben multiplicarse por 1.5 (Porteous & Kermani, 2013).

$$\tau = \frac{F(1.5)}{4dt} = \frac{44.5N}{(4)(5mm)(19.05mm)} = 0.18MPa \quad (51)$$

Donde  $F$  es la fuerza aplicada de 44.5 N,  $d$  es el diámetro del tornillo, y  $t$  es el espesor de la madera de 19.05 mm.

Siguiente, se calculó el aplastamiento de la madera:

$$f_{m,y} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{(0.9)(24MPa)}{1.3} = 16.62MPa \quad (52)$$

Donde  $k_{mod}$  es el factor de duración de carga, dependiendo de la clase de servicio de la madera. Según el Eurocódigo 5, en este caso, el pino utilizado tiene clase de servicio 1, y la carga se aplica durante duraciones cortas, por lo que se utilizó un factor de 0.9.  $\gamma_m$  es el coeficiente parcial para las propiedades de la madera, donde se utilizó 1.3 por ser madera sólida (Porteous & Kermani, 2013). Por último,  $f_{m,k}$  es el factor de esfuerzo a flexión definido anteriormente.

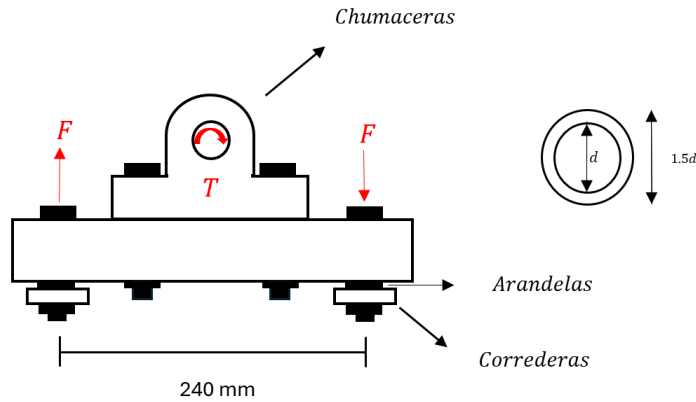
Con lo anterior, se determinó el factor de seguridad de la madera:

$$n = \frac{f_{m,y}}{\tau} = \frac{16.62MPa}{0.18MPa} = 92.33 \quad (53)$$

Donde  $f_{m,y}$  es la flexión resultante en la ecuación 47, y  $\tau$  es el esfuerzo generado en el agujero, calculado en la ecuación 46.

#### 6.11.4. Aplastamiento de madera por esfuerzo de extracción (unión entre correderas y madera)

Figura 98: Unión pernada entre correderas y base secundaria de madera (con chumaceras y tope a 90° de giro).



Fuente: Elaboración propia.

Observando la Figura 89, ambas correderas se anclaron a la base secundaria utilizando 2 tornillos M5 grado 8.8 en cada una. El torque de giro del yugo provoca la rotación en el eje y, por ende, en las chumaceras. Al llegar a 90° y entrar en contacto con el tope, se generan fuerzas opuestas en los tornillos que anclan las correderas a la base secundaria, provocando que dos de ellos intenten extraerse. Se colocaron arandelas entre las correderas y la base secundaria para proporcionar un área específica de aplastamiento por extracción.

El área de aplastamiento por extracción fue calculada de la siguiente forma:

$$A = 2A_t = 2(14.2mm^2) = 28.4mm^2 \quad (54)$$

Donde  $A_t$  es el área de esfuerzo de tensión de ambos tornillos, definida anteriormente.

Se obtuvo la fuerza ejercida en los tornillos:

$$3.3Nm = F(0.13m) \rightarrow F = \frac{3.3Nm}{0.13m} = 25.4N \quad (55)$$

Donde la distancia entre correderas es de 160 mm y que el torque ejercido es de 3.3 N·m.

Se calculó el esfuerzo generado:

$$\sigma = \frac{F(1.5)}{A} = \frac{25.4N(1.5)}{28.4mm^2} = 1.34MPa \quad (56)$$

Donde  $F$  es la fuerza calculada en la ecuación 50, y  $A$  es el área de aplastamiento por extracción según la ecuación 49, tomando en cuenta el incremento de la carga con un factor de 1.5 (Porteous & Kermani, 2013),

Finalmente, se determinó el factor de seguridad:

$$n = \frac{f_{m,y}}{\sigma} = \frac{16.62MPa}{1.34MPa} = 12.4 \quad (57)$$

Donde  $f_{m,y}$  es la flexión resultante en la ecuación 47, y  $\sigma$  es el esfuerzo generado, calculado en la ecuación 51.

## CAPÍTULO 7

---

### Resultados

---

Habiendo sido los resultados de mayor interés e importancia los factores de seguridad, solamente las simulaciones de estos fueron incluidas en el siguiente capítulo. Como se mencionó anteriormente, se incluyó el análisis de la unión más crítica en cada caso de esfuerzo. La discusión de resultados fue desarrollada utilizando resultados adicionales como deformaciones y esfuerzos equivalentes, los cuales fueron referenciados del capítulo anterior.

## 7.1. Cumplimiento de requisitos

Cuadro 13: Verificación de cumplimiento de requisitos.

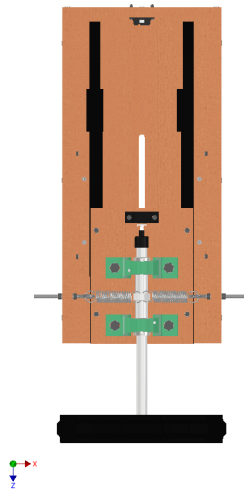
Código	Requisito	Cumple
DI01	Las dimensiones del yugo no deben tener una diferencia mayor al 15 % respecto a las del utilizado en un Cessna 172.	Sí
DI02	El yugo, junto con todos sus componentes, no debe superar un peso de 30 lb.	Sí
DI03	El yugo y sus componentes deben poder ensamblarse en menos de 1 hora.	Sí
DI04	El movimiento de empuje y jalado debe ser logrado mediante el uso de correderas.	Sí
DI05	El sistema debe contar con chumaceras para proporcionar el movimiento de giro.	Sí
FF01	La fuerza retroalimentada en los movimientos de empuje, jalado y giro debe ser generada por dos resortes de tensión.	Sí
SE01	El yugo y los componentes pertinentes deben tener un factor de seguridad superior a 1.5.	Sí
SE02	El yugo y sus componentes no deben tener bordes afilados ni superficies punzantes.	Sí
SM01	El ángulo de giro debe medirse mediante un potenciómetro.	Sí
SM02	El desplazamiento de empuje y jalado debe medirse mediante un sensor de distancia.	Sí
PR01	Para validar el diseño, se deben realizar pruebas con todos los demás módulos del simulador de vuelo.	Sí

Fuente: Elaboración propia.

## 7.2. Sistema ensamblado

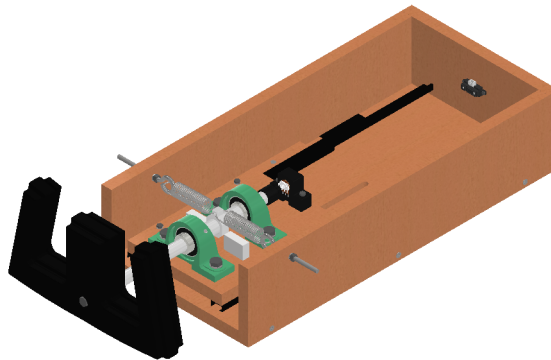
Realizando los anclajes descritos a lo largo de la lectura, se obtuvo el sistema completo:

Figura 99: Sistema de yugo para simulador de vuelo (vista superior).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 100: Sistema de yugo para simulador de vuelo (vista isométrica frontal).



Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk Inc.

En el apartado de anexos, se encontrarán las descomposiciones detalladas del sistema con sus respectivos listados de partes.

### 7.3. Simulaciones

Cuadro 14: Factores de seguridad calculados en simulaciones estáticas estructurales.

Parte	Movimiento	Factor de seguridad (n)
Yugo	Jalado	> 15
Yugo	Empuje	> 15
Yugo	Giro	> 15
Eje	Jalado, empuje y giro simultáneo	9.99
Conector central	Giro	4.07

Fuente: Elaboración propia.

## 7.4. Cálculos manuales

Cuadro 15: Factores de seguridad calculados manualmente.

Parte	Tipo de esfuerzo	Factor de seguridad (n)
Eje	Combinado	10.08 (vida infinita)
Rodamientos	Combinado	552,199,444,512 horas
Base secundaria	Flexión	268
Base secundaria	Aplastamiento por extracción	12.4
Soporte de corredera	Aplastamiento por cortante	92.33
Tornillo M8 de unión entre yugo y eje	Fatiga por tensión	68
Tornillo M5 de unión entre correderas y base primaria	Cortante directo	108.5

Fuente: Elaboración propia.

## 7.5. Movimiento del sistema

Cuadro 16: Cantidades de movimiento.

Tipo de movimiento	Cantidad máxima
Desplazamiento longitudinal	14 cm
Giro	180°

Fuente: Elaboración propia.

## 7.6. Resistencia del sistema

Habiendo aplicado una fuerza de 49 N en cada movimiento del sistema, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 17: Resistencia del sistema durante los movimientos con una fuerza aplicada.

Movimiento	Fuerza aplicada	¿Soporta?
Giro hacia la izquierda	49 N	Sí
Giro hacia la derecha	49 N	Sí
Empuje	49 N	Sí
Jalado	49 N	Sí

Fuente: Elaboración propia.

## 7.7. Costos

Cuadro 18: Costos de materiales.

Cantidad	Material	Monto
1	Barra de aluminio 6061 de 1" de diámetro y 13" de longitud	Q60.00
1	Potenciómetro de perilla de 10 kOhms	Q6.00
1	Sensor de distancia Sharp GP2Y0A21YK0F	Q70.00
1	Plancha de aluminio 6061 de 5" x 6" x 1/2"	Q157.30
1	Impresión 3D del yugo	Q550.00
1	Impresión 3D del conector eje - potenciómetro	Q6.00
1	Impresión 3D de la base para el potenciómetro	Q21.00
1	Correderas de 450 mm de longitud	Q74.99
2	Resortes	Q36.00
1	Madera de pino de 3/4" x 10" x 10'	Q110.21
2	Chumaceras	Q216.48
2	Sujetador de acero inoxidable de 1/4" x 4" con tuercas	Q10.00
4	Arandela plana con diámetro interno de 1/4"	Q1.40
4	Tornillo de cabeza hexagonal diámetro M10, grado 8.8	Q10.00
8	Arandela plana con diámetro interno de 10 mm	Q3.20
4	Tuerca hexagonal M10	Q5.20
10	Tornillo de cabeza allen diámetro M5, grado 8.8	Q40.00
24	Arandela plana con diámetro interno de 5 mm	Q14.40
10	Tuerca hexagonal M5	Q35.00
1	Tornillo de cabeza hexagonal diámetro M8, grado 8.8	Q2.10
2	Tornillo de cabeza allen diámetro M3, grado 8.8	Q3.00
2	Tuerca hexagonal M3	Q1.00
4	Tornillo para madera diámetro 1/4"	Q4.00
6	Tornillo para madera diámetro 3/8"	Q9.00
1	Pintura en spray color café	Q20.00
1	Pintura en spray color negra	Q20.00
	Total	Q1,486.28

Fuente: Elaboración propia.



---

## Análisis de resultados

---

Uno de los factores clave para el éxito del proyecto es la selección de materiales, que influyó directamente en los resultados de las simulaciones y el desempeño del sistema. El uso de PETG para la impresión 3D del yugo es una elección ventajosa por su combinación de resistencia, flexibilidad y facilidad de impresión. El PETG ofrece una buena resistencia mecánica y un balance entre rigidez y ductilidad, lo cual se refleja en los factores de seguridad elevados obtenidos en las simulaciones (con un mínimo de 15 en todos los casos). Estos resultados indican que el material es adecuado para soportar las fuerzas involucradas, permitiendo mantener la integridad del sistema sin fallar bajo las cargas normales de operación. Además, la deformación total es mínima, con un valor máximo de 0.68 mm durante el movimiento de empuje, lo que indica que el material presenta un buen comportamiento en términos de elasticidad y rigidez, manteniendo una experiencia realista para el usuario sin comprometer la durabilidad. A pesar de que el yugo pudo ser impreso con un porcentaje de relleno menor, como el 5 %, y mantener factores de seguridad por encima de 15, se utilizó un 25 % para seguir las recomendaciones investigadas (especificadas en la sección 5.7), sin sacrificar las propiedades estructurales de la pieza. El uso de aluminio 6061 en el eje, el conector central y las placas de contacto es especialmente importante. El aluminio 6061 no solo es un material ampliamente utilizado en aplicaciones aeronáuticas, lo que añade realismo al simulador, sino que también tiene excelentes propiedades mecánicas: es ligero, resistente a la corrosión y tiene buena resistencia tanto a la tracción como a la fatiga. Estas características se reflejan en el factor de seguridad elevado (de 10.08 en el eje), lo cual confirma la solidez del diseño. Este material es ideal para la aplicación, ya que permite lograr una buena relación peso-fuerza, que es crítica en simuladores de vuelo, donde se busca replicar las condiciones reales de las aeronaves. Estas piezas no fueron iteradas debido al costo-beneficio y al realismo que ofrecieron. La madera de pino fue seleccionada para el proyecto debido a varias ventajas clave. En primer lugar, es un material liviano, lo cual facilita el manejo y reduce el peso total del sistema de yugo sin comprometer la resistencia estructural necesaria. Además, es un recurso económico y fácilmente disponible, lo que contribuye a mantener el costo

total del proyecto dentro del presupuesto estipulado. A pesar de los factores de seguridad sumamente elevados, las dimensiones y el diseño de las piezas de madera fueron conservados para poder utilizar el mecanismo de correderas y lograr que el sistema de yugo se ajustara correctamente a la estructura del simulador.

En todos los casos analizados, los factores de seguridad obtenidos son muy superiores al valor mínimo requerido de 1.5. Por ejemplo, el eje tiene un factor de seguridad de 10.08 calculado manualmente y de 9.99 en la simulación de *ANSYS Workbench*, para confirmar que el agujero realizado fuera despreciable. Esto confirma que los componentes fueron dimensionados con respecto a las cargas esperadas, garantizando que no fallarán bajo condiciones normales de operación. Un factor de seguridad elevado no solo asegura la integridad estructural del sistema, sino que también implica que el diseño podría soportar cargas adicionales o imprevistas sin riesgo de falla, lo cual es positivo en términos de durabilidad y confiabilidad. En la madera, el factor de seguridad más alto fue de 268, mientras que el más bajo 12, indicando que soporta de gran forma en relación con las cargas a las que estará sometida. Esto garantiza que, siendo uno de los objetivos mantener los costos bajos, la madera es una elección sensata, ya que es un material económico y fácil de trabajar. La vida útil de los rodamientos calculada es extremadamente alta (552,199,444,512 horas), lo que sugiere que no fallarán durante la vida operativa del simulador, ni siquiera bajo un uso intensivo. Este resultado asegura que los componentes de rotación como el eje y los rodamientos no requerirán ningún reemplazo, lo cual es beneficioso desde el punto de vista de mantenimiento.

Las simulaciones realizadas en *ANSYS Workbench* muestran que las deformaciones máximas de todas las piezas son relativamente pequeñas, lo que implica un buen comportamiento elástico de los materiales. La deformación máxima en el eje, por ejemplo, es de solo 0.016 mm, lo que indica que el eje mantendrá su forma bajo cargas y no sufrirá deformaciones permanentes. Esto es crucial para garantizar una respuesta precisa y realista en el simulador, ya que cualquier deformación excesiva podría afectar la exactitud de los controles.

El sistema de retroalimentación de fuerza, que utiliza resortes de tensión, fue diseñado para proporcionar fuerzas que se experimentarían durante un vuelo. Los resortes deben tensarse 13.24 mm para generar la retroalimentación de fuerza deseada de 44.5 N en los movimientos de empuje y jalado, y 6.7 mm para retroalimentar la fuerza de 22.5 N en el giro. El uso de resortes y el diseño del conector central permiten una distribución uniforme de la fuerza y un comportamiento predecible bajo las cargas de empuje, jalado y giro.

Los tornillos de diferentes tamaños fueron analizados bajo las cargas más críticas, y en todos los casos, los factores de seguridad obtenidos son extremadamente altos (por ejemplo, 68 para el tornillo M8 y 108.5 para tornillos M5). Esto garantiza que el ensamblaje es seguro y que no se espera que ninguna de las uniones falle bajo las fuerzas aplicadas durante el uso normal del simulador. El uso de arandelas también refuerza el sistema, al distribuir las fuerzas y evitar la extracción de los tornillos, lo que contribuye a la durabilidad. A pesar de los factores de seguridad elevados, se mantuvieron los tamaños estandarizados en todo el simulador, ya que los demás módulos utilizaron los mismos tipos de tornillos, lo que simplifica el mantenimiento y asegura un ensamblaje seguro.

---

### Conclusiones

---

1. Se logró diseñar y construir un sistema de yugo para simulador de vuelo con un enfoque en el entrenamiento de pilotos, dentro del límite de presupuesto de Q1,500.00.
2. Se especificaron correctamente los requisitos de diseño para el yugo, considerando aspectos técnicos que garantizaron que el diseño cumpliera con los estándares de funcionalidad y seguridad esperados.
3. La elección de materiales, particularmente la madera de pino, demostró ser acertada. Se utilizó por su disponibilidad y bajo costo, lo que contribuyó al cumplimiento del presupuesto sin comprometer la resistencia estructural o la calidad del sistema.
4. El uso de herramientas como *ANSYS Workbench* y *Autodesk Inventor* permitió validar el diseño del sistema a través de simulaciones, asegurando que las cargas y esfuerzos a los que se someterá el yugo sean soportados sin fallas.
5. La incorporación de técnicas de impresión 3D en la fabricación de componentes permitió la personalización y reducción de costos en piezas específicas, sin comprometer la funcionalidad o la resistencia del sistema.
6. Se cumplieron los objetivos de diseñar un sistema funcional para el usuario. El sistema de yugo tiene una configuración que asegura comodidad en su uso prolongado, al mismo tiempo que cumple con los requisitos especificados.
7. Los manuales de fabricación, ensamble y uso del sistema de yugo estandarizan los procedimientos, facilitando su construcción y operación, asegurando la replicabilidad y sostenibilidad del proyecto a largo plazo.
8. El proyecto mejora la accesibilidad a simuladores de vuelo en Guatemala, ofreciendo una solución económica y eficiente como alternativa a la importación de equipos especializados para centros de formación locales.
9. El trabajo permitió demostrar que es posible diseñar y construir un simulador de vuelo

funcional y accesible en términos de costo, utilizando tecnologías de fabricación modernas y materiales locales.

1. Se recomienda explorar el uso de diferentes materiales y técnicas de fabricación, como compuestos o aleaciones metálicas, que podrían mejorar la durabilidad y el rendimiento del yugo, así como su relación costo-beneficio.
2. Se recomienda lubricar las correderas, para proporcionar un desplazamiento más suave y fluido.
3. Se sugiere realizar estudios adicionales para optimizar el diseño del yugo, considerando análisis avanzados de simulación y modelado para reducir el peso sin comprometer la seguridad y funcionalidad.
4. Sería beneficioso extender la investigación hacia el desarrollo de módulos adicionales que complementen el yugo, como sistemas de retroalimentación háptica, para ofrecer una experiencia de simulación más inmersiva y realista.
5. Se aconseja realizar un análisis exhaustivo de costos que considere no solo la fabricación del yugo, sino también su mantenimiento y posibles actualizaciones, con el fin de facilitar la toma de decisiones en futuras implementaciones.
6. Se sugiere establecer alianzas con instituciones educativas y centros de formación aeronáutica para fomentar la investigación colaborativa y el desarrollo continuo de tecnología relacionada con simuladores de vuelo en Guatemala.



- A. Essameldin, A. B., O. Abuzied. (2023). Motion Cueing Algorithm for Flight Simulator: Interfacing and Pilot Controls Implementation. *MSA University Journal*, 2(2), 16.
- A. Garg, T. C., R. Islam. (2013). Evolution of Aircraft Flight Control System and Fly-By-Light Control System. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(12).
- Adamski, M. (2020). Ergonomic and Psychomotor Conditions of Pilot's Work Environment. *7th International Conference Integrity-Reliability-Failure.*, 477-486.
- AeroTraining. (2023). Simulador de vuelo. <https://www.aerotraining.net/simulador-de-vuelo/>.
- Amazon. (2024). NTN P203 pillow block. <https://www.amazon.com/-/es/NTN-P203-de-bloque-de-almohada/dp/B00RW7P90U>.
- ANSYS, I. (2019). ANSYS Mechanical User's Guide. (R1).
- Boissonneault, T. (2024). Infill Percentage Prints and More. <https://acortar.link/NXUpHZ>.
- Budynas & Nisbett. (2015). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. *Décima edición*. Cambridge. (2023). Interface. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/interface>.
- Cemaco. (2024). Perno de Anclaje 1/4 x 4". <https://acortar.link/zyNMkb>.
- CEN. (2012). Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species. European Standard EN 1912.
- CEN. (2016). Structural Timber - Strength classes. European Standard EN 338.
- CMP. (2020). Aluminum Aircraft Yoke. <https://www.cardicmachine.com/portfolio/aluminum-aircraft-yoke/>.
- Cockpitturk. (2023). Cessna 172 Control Wheel Yoke. <https://acortar.link/nkfiom>.
- D. Wu, H. L., H. Gu. (2009). Development of a Novel Low-Cost Flight Simulator for Pilot Training. *World Academy of Science, Engineering and Technology*.
- DGAC. (2022). Escuelas de Instrucción Aeronáutica. *Gobierno de Guatemala*, 1 (Re-Edición 3).
- EFA. (2019). Cessna 172 Skyhawk. <https://epicflightacademy.com/cessna-172/>.
- Elite. (2023). PI-135-S Desktop BATD. <https://flyelite.com/product/pi-135-s-desktop-batd/>.
- Emad. (2012). Sharp GP2Y0A21YK0F. <https://grabcad.com/emad-3>.
- EMR. (2022). Mercado de Simuladores de Vuelo en América Latina. <https://acortar.link/DqAgB8>.

- European Aviation Safety Agency. (2003). Certification Specifications for Normal, Utility Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes CS-23. (1), 1-B-11.
- Fulgencio. (2018). ¿Cómo se controlan los aviones en vuelo? <https://acortar.link/6oeVqY>.
- Iberia. (2023). Controles de vuelo primarios y secundarios: ¿qué elementos definen como se mueve un avión? <https://megustavolar.iberia.com/2023/05/29/controles-de-vuelo-primarios-y-secundarios-que-elementos-definen-como-se-mueve-un-avion/>.
- Ideal. (2016). ¿Cuánto pesa cada parte de tu cuerpo? <https://acortar.link/oBWWZ2>.
- IrisDynamics. (2022). What is Force Feedback: Explained. <https://irisdynamics.com/articles/what-is-force-feedback>.
- Knape & Vogt. (2024). 1805T WH 450. <https://www.knapeandvogt.com/content/1805t-wh-450>.
- M. Mori, T. T., W. Kitagawa. (2013). Design of Two-Degree-of-Freedom Electromagnetic Actuator using PMSM and LSM. *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 21(3), 476-481.
- MatWeb. (2023). Aluminum 6061-T6; 6061-T651. <https://acortar.link/lYHbEo>.
- Mercado, J. (2020). Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications. *National Library of Medicine*.
- MINTRAB. (2023). Salario Mínimo. <https://acortar.link/yWiUh7>.
- NTN. (2020a). Item number UC204-012D1, Bearing Insert w/ Set Screw, Wide Inner Ring - Spherical O.D. <https://bearingfinder.ntnamericas.com/item/set-screw-type-bearings/set-screw-type-bearings—spherical-o-d-/uc204-012d1>.
- NTN. (2020b). Rodamientos de Bolas y Rodillos. 2(2202), B-80 a B-81.
- NTN. (2023). UCP200, Pillow block bearing unit from grey cast. <https://acortar.link/wOENfk>.
- Oleksandr, V. (2023). Potentiometer 10K. <https://grabcad.com/library/potentiometer-10k-2>.
- Oliva, O. E. (2022). Caracterización de propiedades mecánicas de polímeros impresos en 3D (Trabajo de Graduación). *Universidad Del Valle de Guatemala*.
- Porteous & Kermani. (2013). Structural Timber Design to Eurocode 5. *Segunda edición*.
- PrensaLibre. (2019). Empresa quetzalteca crea sistema para simuladores de vuelo y participa en exposición en Berlín. <https://www.prensalibre.com/ciudades/quetzaltenango/empresa-quetzalteca-crea-sistema-para-simuladores-de-vuelo-y-participa-en-exposicion-en-berlin/>.
- Proportion-Air. (2022). Flight Simulator Controls. <https://proportionair.com/project/flight-simulator-controls/>.
- Sim2do. (2016). Pilot Training System Elite PI-135 Basic. <https://acortar.link/TUGMtq>.
- SpectraSymbol. (2023). What are different types of position sensors? <https://acortar.link/A2V3mF>.
- Suárez, P. (2022). Programa interfaz HID basado en Arduino para conectar controles de simulador de vuelo a PC. <https://acortar.link/68TrNo>.
- Tettsa. (2024a). Potenciometro 10K, 3 Pines, WH148, 15MM. <https://acortar.link/J5CRud>.
- Tettsa. (2024b). Sensor Distancia Sharp GP2Y0A21YK0F. <https://acortar.link/k34hZV>.
- Twombly, I. (2019). What Am I: Yank and Bank (The Yoke is where the Action is). <https://acortar.link/6WRCHO>.
- US. (2018). Implantación de un sistema de aprovisionamiento automático en una empresa del sector aeronáutico. <https://acortar.link/CfyWaS>.
- Variohm. (2019). Linear Position Sensors. <https://www.variohm.com/products/linear-position-sensors->

## 12.1. Protocolo de pruebas y pruebas

Figura 101: Giro hacia la derecha con fuerza de 49 N aplicada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 102: Giro hacia la izquierda con fuerza de 49 N aplicada.



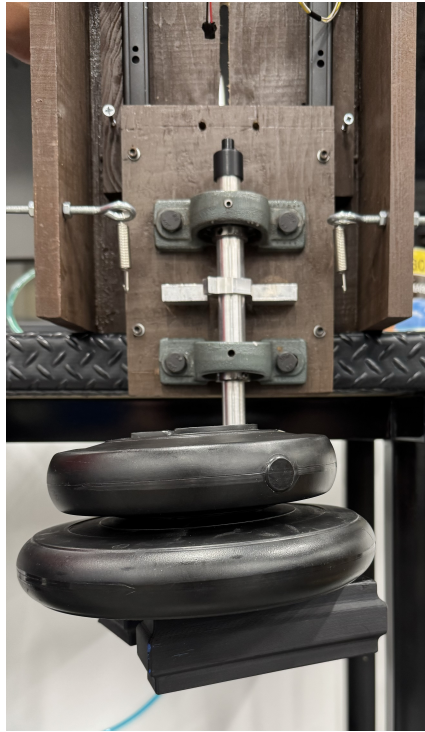
Fuente: Elaboración propia.

Figura 103: Empuje con fuerza de 49 N aplicada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 104: Jalado con fuerza de 49 N aplicada.



Fuente: Elaboración propia.

## 12.2. Manual de fabricación y ensamble

En esta sección, se incluye el manual de fabricación y ensamble del prototipo, incluyendo los procesos para fabricar cada uno de los componentes y llegar al producto final.

## 12.3. Manual de uso

El manual de uso proporciona al usuario una guía sobre cómo utilizar el sistema de yugo, que forma parte del simulador de vuelo.

## 12.4. Planos de construcción

A continuación, se detallan los planos del ensamble general del sistema, así como las vistas en explosión de los subensambles y las dimensiones de las piezas que lo conforman.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



## **Protocolo de pruebas**

Diseño y construcción de yugo para simulador de vuelo enfocado  
en entrenamiento de pilotos

Elaborado por:  
Nicholas MacVean Gutierrez  
Carné: 20145

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala, mayo de 2024

## 1. Introducción

Siendo el sistema de yugo uno de los cuatro módulos principales del simulador de vuelo, encargado de direccionar la aeronave durante las simulaciones, el objetivo de las pruebas es verificar la resistencia del yugo y sus componentes durante su uso. Con base en los resultados obtenidos, se podrán realizar los ajustes necesarios en el diseño para alcanzar los resultados esperados. Dichos ajustes pueden incluir modificaciones en los componentes o las bases.

## 2. Equipo de medición

Equipo de medición				
No.	Descripción	Especificaciones	Certificado/Estándar	Observaciones
1	Pesa	Disco de 2 kg o 19.6 N	Norma ISO 20957	N/A
2	Pesa	Disco de 3 kg o 29.4 N	Norma ISO 20957	N/A

### 3. Identificación de peligros

Identificación de peligros				
No.	Tipo	Descripción	Control(es)	Instrumento/equipo
1	De seguridad	Al realizar las pruebas, algunas uniones atornilladas o componentes podrían fallar, lo que expondría al usuario a golpes en las extremidades debido a la caída del sistema completo o de alguno de sus componentes. Del mismo modo, la caída de alguna de las pesas circulares podría causar lesiones al usuario.	Administrativo	Procedimiento definido y <i>check list</i> .
			EPP	Zapatos de cuero tipo bota con punta de acero, pantalón de lona sin rasgaduras, camisa de manga larga y bata de laboratorio.
2	De seguridad	Si el yugo falla al realizar alguno de los movimientos, el usuario puede ser expuesto a proyectiles de fragmentos de PETG.	Administrativo	Procedimiento definido y <i>check list</i> .
			EPP	Lentes de seguridad de policarbonato con lente clara y transparente.

### 4. Equipo de protección personal (EPP) y equipo de mitigación

Equipo de protección personal (EPP)		
Cant.	Descripción	Verificado
2	Zapatos de cuero tipo bota con punta de acero.	✓
1	Pantalón de lona sin rasgaduras.	✓
1	Camisa de manga larga.	✓
1	Bata de laboratorio.	✓
1	Lentes de seguridad de policarbonato con lente clara y transparente.	✓

### 5. Especificaciones técnicas

- Dimensiones del sistema de yugo
  - Altura: 22 cm
  - Ancho: 30 cm
  - Profundidad: 77 cm
- Materiales del sistema de yugo
  - Yugo: PETG
  - Bases: madera de pino
  - Paredes laterales: madera de pino
  - Pared posterior: madera de pino
  - Eje: aluminio
  - Rodamientos: acero
  - Carcasa de chumacera: hierro
  - Resortes: acero

- Conector central del mecanismo de tope: aluminio
- Placas de contacto del mecanismo de tope: aluminio
- Sujetadores de resortes: acero
- Base de soporte para potenciómetro: PETG
- Pieza de conexión entre el eje y perilla del potenciómetro: PETG
- Potenciómetro: aluminio y cobre
- Cables de conexión en componentes de medición: silicón y cobre
- Tornillos: zinc y hierro negro
- Arandelas: acero inoxidable
- Tuercas: hierro negro y acero inoxidable
- Materiales de las pesas
  - Disco: polietileno
  - Relleno: cemento, arena



# ANEXO 1

## CONOCIMIENTO Y CUMPLIMIENTO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

Instrucciones:

El presente documento deberá ser llenado por todas las personas que participarán de las pruebas del prototipo elaborado en el trabajo de graduación o proyecto “Nombre del trabajo/proyecto” y su firma implica su conformidad con el siguiente enunciado:

*“Como firmante del presente documento declaro que he tenido a la vista el protocolo de pruebas del trabajo arriba nombrado; que soy consciente de los peligros identificados y plenamente detallados en el protocolo en cuestión, asociados a las pruebas a realizarse en la fecha indicada en este documento y que conozco los procedimientos y acciones a tomar para mitigar dichos peligros. Así mismo declaro tener conocimiento del procedimiento de pruebas y medición, y del protocolo de emergencia en caso de incidentes, anexo 2 y que los mismos se encuentra en formato impreso en el lugar de las pruebas. Declaro también que la información proporcionada por mi parte en los anexos 1 y 2 son verídicos y que he tomado el tiempo de verificar la información contenida en el anexo 2 por lo que he firmado los mismos. Habiendo declarado lo anterior, asumo la responsabilidad de mis actos y cualquier consecuencia o implicación que se desprenda de ellos.”*

Listado de personas		
Carné	Nombre	Firma
20145	Nicholas MacVean	
20527	Luis Pablo Salvatierra	

Guatemala, 30 de septiembre de 2024

## DECLARACIÓN DE ESTADO Y DISPONIBILIDAD

Instrucciones:

Evalúe su estado y disponibilidad para participar de las pruebas teniendo conciencia de que su indisponibilidad en uno solo de las condiciones evaluadas inhabilitará en su participación ya que las mismas influyen en su seguridad personal y la de los demás participantes. Llenar una copia por cada participante.

Marque con una X la casilla correspondiente sin salirse del espacio.

No.	Condición evaluada	SÍ	NO
1	He ingerido bebidas alcohólicas o sustancias alucinógenas que alteran mi estado de percepción durante las últimas 72 hrs.		X
2	Me siento agotado física o mentalmente por lo que mi concentración o habilidades físicas pueden verse comprometidas.		X
3	Tengo un problema personal/laboral que altera mi estado de ánimo.		X
4	Me siento incómodo con, o indispuerto hacia alguno de los otros participantes de las pruebas por cualquier circunstancia.		X
5	Mi estado de ánimo y mi disposición son positivos por lo que considero que mi participación será de aporte para las pruebas.	X	
6	Puedo proporcionar el nombre y número telefónico de una persona a la que contactar en caso de emergencia por cualquier incidente que se presente durante las pruebas.	X	

Declaro que las respuestas a los aspectos evaluados en la tabla anterior son verdaderas por lo que me declaro habilitado para participar en las pruebas de la presente fecha.

Fecha: Guatemala, 30 de septiembre de 2024

Nombre: Nicholas MacVean

Firma: 

### Contacto para caso de emergencia:

Nombre: \_\_\_\_\_

Número(s) telefónico(s): \_\_\_\_\_

Correo electrónico: \_\_\_\_\_

## ANEXO 2

### VERIFICACIÓN DE EPP Y EQUIPO DE MITIGACIÓN REQUERIDO

Instrucciones:

El estudiante a cargo de las pruebas marcará con una X la casilla de verificación para cada uno de los equipos listados. La necesidad de la disponibilidad de este equipo fue determinada durante el proceso de identificación de peligros por lo que es de carácter obligatorio. No se permite el uso de equipo que no cumpla con las especificaciones declaradas en el listado.

Los demás participantes deberán declarar su visto bueno mediante su firma en el listado mostrado abajo.

Equipo de protección personal (EPP)		
Cant.	Descripción	Verificado (✓/X)
2	Zapatos de cuero tipo bota con punta de acero.	✓
1	Pantalón de lona sin rasgaduras.	✓
1	Camisa de manga larga.	✓
1	Bata de laboratorio.	✓
1	Lentes de seguridad de policarbonato con lente clara y transparente.	✓

Fecha: Guatemala, 30 de septiembre de 2024

Estudiante a cargo: Nicholas MacVean

Firma: \_\_\_\_\_



## PROTOCOLO DE EMERGENCIA

### 1. En caso de un accidente:



- i. Conservar la calma en todo momento.
- ii. Apague la máquina si la misma aún se encuentra encendida.
- iii. Asegure que las necesidades físicas y emocionales de la persona son atendidas.
- iv. No intente brindar primeros auxilios para los que no cuenta con formación previa.
- v. Coordine con los demás participantes de las pruebas la atención médica necesaria para la persona accidentada contactando a las instituciones correspondientes.
- vi. Si las pruebas se están realizando dentro de las instalaciones de la universidad comuníquese a los números y personas indicadas en la siguiente sección.
- vii. Informe al contacto proporcionado para casos de emergencia.
- viii. Informe al asesor del trabajo de graduación o proyecto una vez la situación se encuentre controlada.

### 2. Contactos de emergencia.

- i. Bomberos voluntarios: 122
- ii. Bomberos municipales (ciudad capital): 123
- iii. Bomberos municipales departamentales: 1554

#### Dentro de la UVG tome en cuenta los siguientes contactos:

- i. Alerta Médica: 1711
- ii. Clínica Médica UVG: extensión 21312, edificio F, oficina F119-F120 (debajo de la plaza Paiz Riera)
- iii. Jefe de seguridad UVG, Lic. Nelson Aldana: 59781736, Sótano 1 CIT, oficina 8S1, según lo amerite el accidente.
- iv. Secretaría General: 2369-8333, oficina F-205, según lo amerite el accidente.

Visto bueno de participantes		
Carné	Nombre	Firma
20145	Nicholas MacVean	
20527	Luis Pablo Salvatierra	

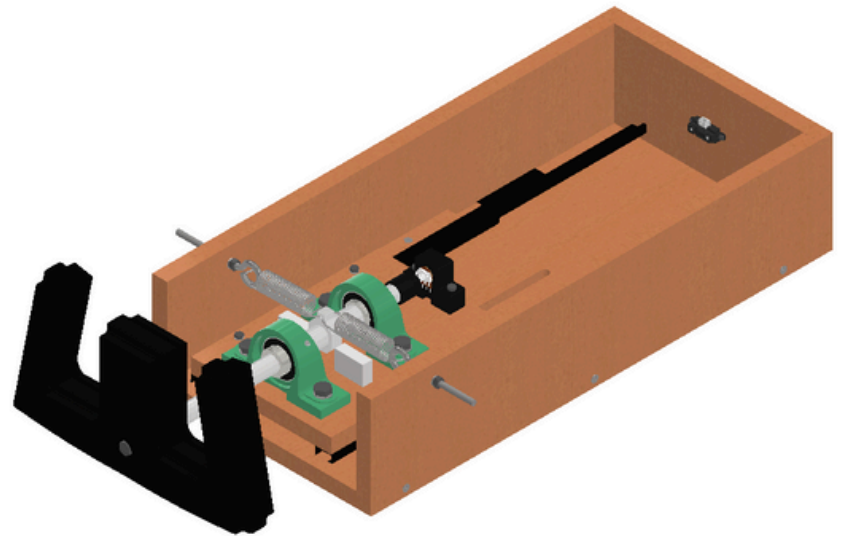
## PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS Y MEDICIONES

Verificaciones técnicas previas		
Paso	Descripción	Verificado (✓/X)
1.	Verificar que las uniones atornilladas entre la base principal de madera y sus paredes estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
2.	Verificar que las uniones atornilladas entre la base principal de madera y los soportes de madera de las correderas estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
3.	Verificar que las uniones atornilladas entre los soportes de madera de las correderas y las mismas estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
4.	Verificar que las uniones atornilladas entre las correderas y la base secundaria de madera estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
5.	Comprobar el deslizamiento de las correderas.	✓
Desviación del procedimiento:		
6.	Verificar que la unión atornillada entre la base de soporte del potenciómetro y la base secundaria de madera esté debidamente apretada.	✓

Desviación del procedimiento:		
7.	Verificar que el potenciómetro esté debidamente colocado en su base de soporte.	✓
Desviación del procedimiento:		
8.	Verificar que la perilla del potenciómetro esté debidamente ingresada al conector eje - potenciómetro.	✓
Desviación del procedimiento:		
9.	Verificar que el conector eje – potenciómetro esté debidamente ingresado en el eje.	✓
Desviación del procedimiento:		
10.	Verificar que la unión atornillada entre el sensor de distancia y la pared posterior esté debidamente apretada.	✓
Desviación del procedimiento:		
11.	Verificar que las uniones atornilladas entre las chumaceras y la base secundaria estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
12.	Comprobar el giro de los rodamientos.	✓

Desviación del procedimiento:		
13.	Verificar que la castigadera del conector central esté debidamente apretada.	✓
Desviación del procedimiento:		
14.	Verificar que las uniones atornilladas entre las placas de contacto y la base secundaria estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
15.	Verificar que la unión atornillada entre los sujetadores de resortes y las paredes laterales de la base primaria estén debidamente apretadas.	✓
Desviación del procedimiento:		
16.	Verificar que el conector central del mecanismo de tope esté correctamente alineado verticalmente respecto al yugo (posición de 0° en giro).	✓
Desviación del procedimiento:		
17.	Verificar que la unión atornillada entre el eje y yugo esté debidamente apretada.	✓
Desviación del procedimiento:		

Verificación de resistencia con fuerza total de 49 N		
Paso	Descripción	Soporta (✓/X)
1.	Colocar el sistema de yugo en su posición de operación y luego girar el yugo hasta su máxima inclinación hacia la derecha. Colocar ambas pesas sobre el agarrador izquierdo del yugo, de modo que se aplique esfuerzo mientras se simula el movimiento. Con la ayuda de otra persona, asegurar que las pesas no se deslicen y permanezcan en su lugar.	✓
En caso de que no haya soportado, indicar qué pieza(s) falla(n):		
2.	Repetir el paso 1, girando el yugo hasta su máxima inclinación a la izquierda.	✓
En caso de que no haya soportado, indicar qué pieza(s) falla(n):		
3.	Colocar el sistema de yugo en posición vertical, de manera que la pared posterior quede sobre una superficie plana. Colocar ambas pesas sobre la cara frontal del yugo, de modo que se aplique esfuerzo mientras se simula el movimiento de empuje. Con la ayuda de otra persona, asegurar que las pesas no se deslicen y permanezcan en su lugar.	✓
En caso de que no haya soportado, indicar qué pieza(s) falla(n):		
4.	Colocar el sistema de yugo en posición vertical sobre una superficie plana, de manera que la base secundaria pueda realizar su recorrido hasta el tope sin interrupciones. Colocar ambas pesas sobre la cara posterior del yugo, de modo que se aplique esfuerzo mientras se simula el movimiento de jalado. Con la ayuda de otra persona, asegurar que las pesas no se deslicen y permanezcan en su lugar.	✓
En caso de que no haya soportado, indicar qué pieza(s) falla(n):		



# MANUAL DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE

SISTEMA DE YUGO PARA  
SIMULADOR DE VUELO

---

# ÍNDICE

---

Introducción .....	1
Fabricación .....	2
Equipo de protección personal .....	3
Madera .....	4
Herramientas a utilizar .....	4
Base primaria .....	6
Base secundaria .....	7
Paredes laterales .....	8
Pared posterior .....	9
Soportes para correderas .....	10
Aluminio .....	11
Herramientas a utilizar .....	12
Eje .....	14
Placas de contacto .....	15
Conector central .....	16
Impresiones 3D .....	17
Herramientas a utilizar .....	17
Conector eje-potenciómetro .....	18
Base potenciómetro .....	19
Yugo .....	20
Ensamble .....	21
Herramientas a utilizar .....	22
Procedimiento .....	23

# INTRODUCCIÓN

---

El presente manual tiene como objetivo detallar el proceso de fabricación y ensamblaje del sistema de yugo diseñado para un simulador de vuelo. A lo largo del documento, se expondrán las etapas clave para transformar los materiales en un producto funcional, proporcionando las instrucciones necesarias para asegurar un ensamblaje preciso y eficiente. Este manual está dirigido a técnicos, estudiantes o entusiastas que deseen replicar o comprender el proceso de construcción de este componente, contribuyendo así al desarrollo de soluciones accesibles para el entrenamiento de pilotos.

---

# FABRICACIÓN

---

# EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

---

Al utilizar maquinaria para realizar los cortes y perforaciones necesarios, se recomienda utilizar el siguiente equipo de protección personal:

- 2x bota de cuero con punta de acero. (Figura 1)
- 1x pantalón de lona sin rasgaduras. (Figura 2)
- 1x bata de laboratorio. (Figura 3)
- 1x lentes de seguridad de policarbonato con lente clara y transparente. (Figura 4)



Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4

# MADERA

---

Al obtener la plancha de madera de pino de 3/4" x 10" x 10', se deben cortar y perforar las distintas piezas para crear la estructura. La madera restante es útil en caso de que alguna pieza deba repetirse.

Herramientas a utilizar:

- 1x sierra de mano para madera o sierra eléctrica.



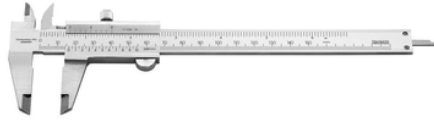
- 1x sargento.



- 1x kit de taladro con diversos tamaños de broca.



- 1x calibrador vernier.

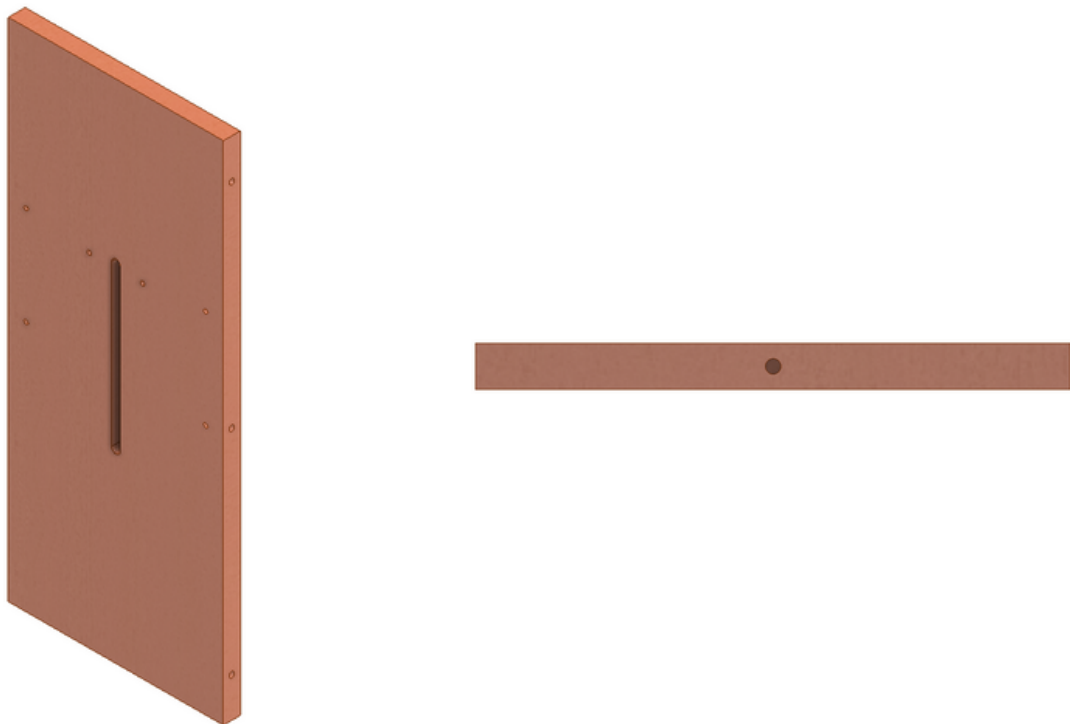


- 1x cinta métrica.



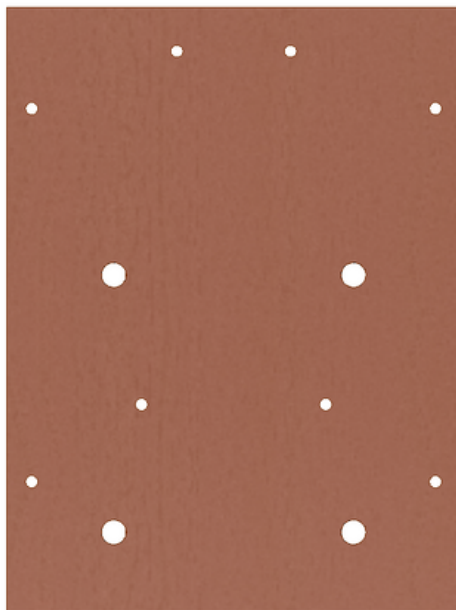
# Base primaria

1. Ubicar un lugar adecuado y luego sujetar la madera con el sargento.
2. Utilizando como guía el dibujo número 4 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Realizar los cortes con la sierra de mano o eléctrica hasta alcanzar la base y la altura necesarias.
  - b. Colocar en el taladro una broca para madera de 3/16", y realizar los 4 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos.
  - c. Colocar en el taladro una broca para madera de 1/4", y realizar los 7 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos.
  - d. Colocar en el taladro una broca de 5 mm, y realizar los 2 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos. Si al insertar los tornillos M5 el ajuste es muy apretado, se puede utilizar una broca de 13/64".
  - e. Colocar en el taladro una broca para madera de 10 mm y realizar la ranura, asegurándose de que quede recta.



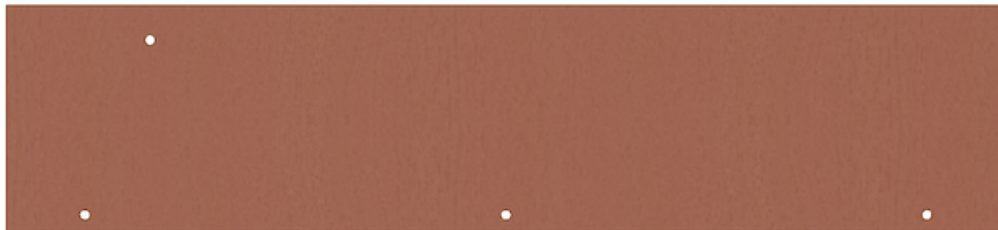
# Base secundaria

1. Ubicar un lugar adecuado y luego sujetar la madera con el sargento.
2. Utilizando como guía el dibujo número 5 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Realizar los cortes con la sierra de mano o eléctrica hasta alcanzar la base y la altura necesarias.
  - b. Colocar en el taladro una broca para madera de 5 mm, y realizar los 8 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos. Si al insertar los tornillos M5 el ajuste es muy apretado, se puede utilizar una broca de 13/64".
  - c. Colocar en el taladro una broca para madera de 10 mm, y realizar los 4 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos. Si al insertar los tornillos M10 el ajuste es muy apretado, se puede utilizar una broca de 13/32".



# Paredes laterales

1. Ubicar un lugar adecuado y luego sujetar la madera con el sargento.
2. Utilizando como guía el dibujo número 6 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Realizar los cortes con la sierra de mano o eléctrica hasta alcanzar la base y la altura necesarias.
  - b. Colocar en el taladro una broca para madera de 1/4", y realizar los 5 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos. Si al insertar sujetador de resorte el ajuste es muy apretado, se puede utilizar una broca de 17/64".
3. Repetir los pasos 1 y 2 para la segunda pared lateral.



# Pared posterior

1. Ubicar un lugar adecuado y luego sujetar la madera con el sargento.
2. Utilizando como guía el dibujo número 7 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Realizar los cortes con la sierra de mano o eléctrica hasta alcanzar la base y la altura necesarias.
  - b. Colocar en el taladro una broca para madera de 1/4", y realizar los 4 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos.
  - c. Colocar en el taladro una broca para madera de 3 mm, y realizar los 3 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos. Si al ingresar los tornillos M3 el ajuste es muy apretado, se puede utilizar una broca de 4 mm.



# Soportes para correderas

1. Ubicar un lugar adecuado y luego sujetar la madera con el sargento.
2. Utilizando como guía el dibujo número 8 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Realizar los cortes con la sierra de mano o eléctrica hasta alcanzar la base y la altura necesarias.
  - b. Colocar en el taladro una broca para madera de 1/4", y realizar los 5 agujeros correspondientes, asegurándose de que queden rectos. Si al insertar los tornillos M5 el ajuste es muy apretado, se puede utilizar una broca de 13/64".
3. Repetir los pasos 1 y 2 para el segundo soporte.



# ALUMINIO

---

Al obtener la plancha de aluminio 6061 de 5" x 6" x 1/2" y la barra de aluminio 6061 de 1" x 13", se deben cortar, perforar y maquinar las distintas piezas para crear los componentes. Es de suma importancia utilizar las máquinas y herramientas solo cuando un operador/encargado esté presente.

Herramientas a utilizar:

- 1x sierra de mano para metal.



- 3x kit de machos para crear roscas (M5, M8 y 1/4").



- 1x lima para metal.



- 1x calibrador vernier.



- 1x taladro de pedestal.



- 1x torno.



- 1x fresadora.



- 1x torno.

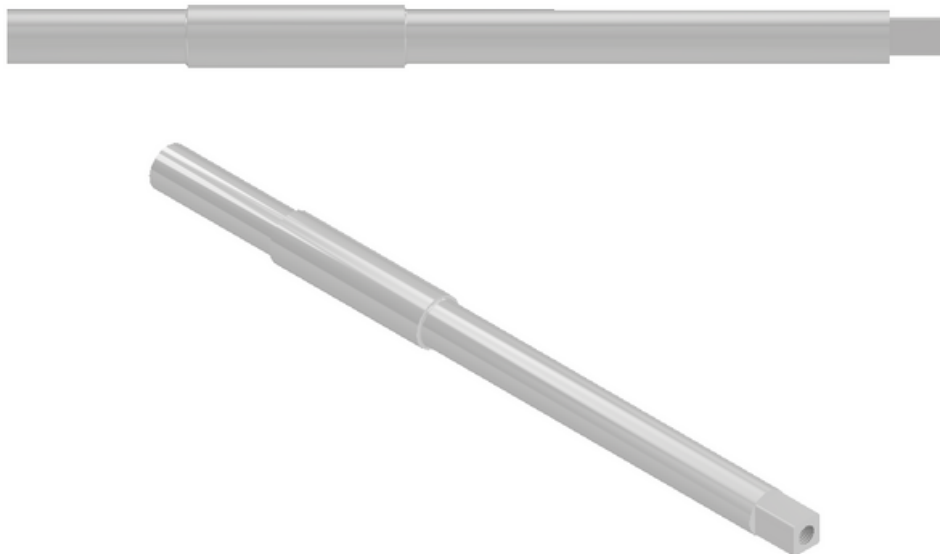


- 1x prensa de banco



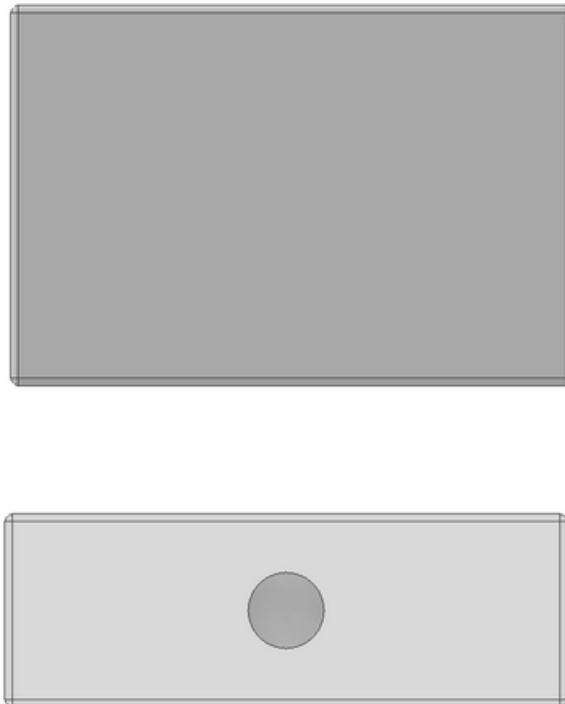
# Eje

1. Calibrar y preparar el torno con la ayuda del operario/encargado.
2. Colocar la barra cilíndrica en el torno según las maneras requeridas y moverla conforme sea necesario.
3. Utilizando como guía el dibujo número 9 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Realizar un cilindrado para llegar al diámetro superior necesario y eliminar imperfecciones en la superficie.
  - b. De izquierda a derecha, realizar la primera sección del eje, asegurando que el radio en el hombro quede de la medida necesaria para el asentamiento del rodamiento.
  - c. De izquierda a derecha, realizar la tercera sección del eje, asegurando que el radio en el hombro quede de la medida necesaria para el asentamiento del segundo rodamiento.
4. Preparar el taladro de pedestal con la ayuda del operario/encargado, colocando una broca de 8 mm.
5. Colocar el eje en el taladro de pedestal.
  - a. Maquinar la sección cuadrada del eje, asegurando que los 4 radios queden de la medida necesaria.
  - b. Realizar el agujero en el eje.
6. Con el kit de machos correspondiente, crear la rosca para la utilización de un tornillo M8.



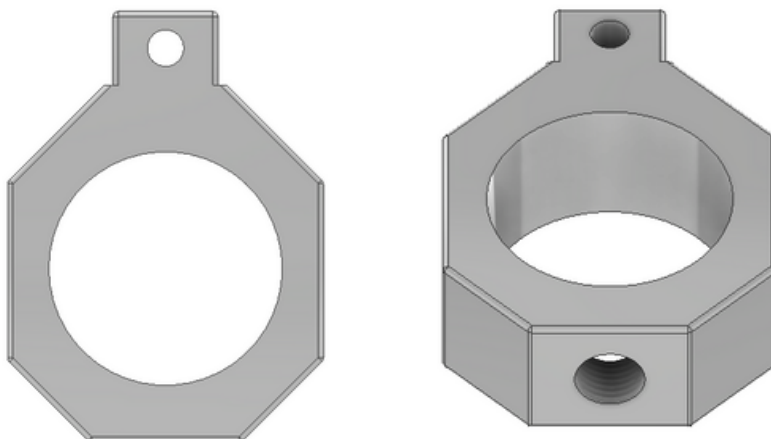
# Placa de contacto

1. Con la sierra de mano para metal y la prensa de banco, cortar una placa de aluminio con base de 40 mm y altura de 30 mm.
2. Preparar la fresadora con la ayuda del operario/encargado.
3. Colocar la placa de aluminio en la fresadora.
4. Utilizando como guía el dibujo número 13 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Ajustar las medidas de la base y la altura hasta que queden con las dimensiones requeridas.
5. Preparar el taladro de pedestal con ayuda del operario/encargado, colocando una broca de 5 mm.
6. Colocar la placa en el taladro de pedestal.
  - a. Realizar el agujero en la placa.
7. Con el kit de machos correspondiente, crear la rosca para la utilización de un tornillo M5.
8. Repetir desde el paso 1 al 7 para la segunda placa de contacto.
9. Con la lima para metal, eliminar cualquier borde que sea filoso en ambas placas.



# Conector central

1. Con la sierra de mano para metal y la prensa de banco, cortar una placa de aluminio con base de 40 mm y altura de 30 mm.
2. Preparar la fresadora con la ayuda del operario/encargado.
3. Colocar la placa en la fresadora.
4. Utilizando como guía el dibujo número 14 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Ajustar las medidas de la base y la altura hasta que queden con las dimensiones requeridas.
  - b. Realizar los diversos cortes rectos y a 45°, hasta obtener la geometría correcta.
5. Preparar el taladro de pedestal con ayuda del operario/encargado, colocando una broca de 7/8".
6. Colocar el conector central en el taladro de pedestal.
  - a. Realizar el agujero central.
7. Colocar una broca de 3 mm en el taladro de pedestal.
  - a. Ajustar la orientación del conector central.
  - b. Realizar el agujero correspondiente en la parte superior de la cara frontal del conector central.
8. Colocar una broca de 1/4" en el taladro de pedestal.
  - a. Ajustar la orientación del conector central.
  - b. Realizar el agujero correspondiente en la parte inferior de la cara del conector central.
9. Con el kit de machos correspondiente, crear la rosca para la utilización de la castigadera de 1/4".
10. Con la lima para metal, eliminar cualquier borde que sea filoso.



# IMPRESIONES 3D

---

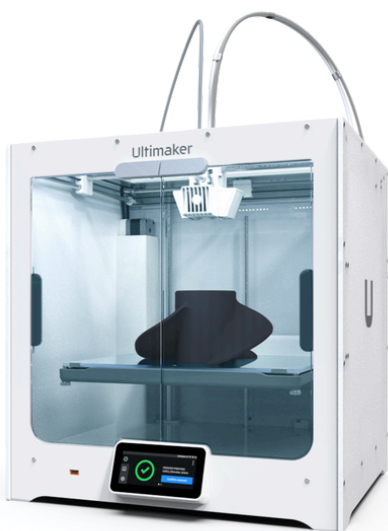
Al realizar las impresiones con PETG, se debe asegurar de tener suficiente material disponible para que ninguna impresión deba detenerse, ya que se tendría que repetir la pieza.

Herramientas a utilizar:

- 1x computadora con programas *Autodesk Inventor* y *Ultimaker Cura* instalados.

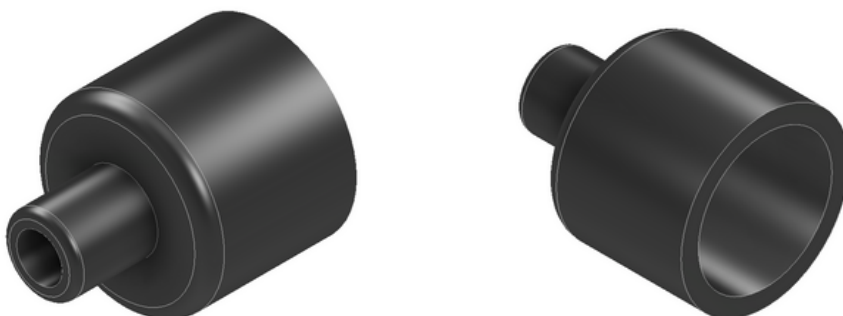


- 1x impresora Ultimaker S5 con su respectivo USB.
- 1x espátula de metal.



# Conector eje-potenciómetro

1. Utilizando como guía el dibujo número 10 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Diseñar la pieza en el programa *Autodesk Inventor*.
  - b. Exportarla en formato *.stl*.
2. Abrir el programa *Ultimaker Cura*.
3. Seleccionar la impresora *Ultimaker S5*.
4. Abrir el archivo de la pieza y colocarla correctamente en la cama de impresión.
5. Especificar los siguientes parámetros:
  - a. Material: PETG
  - b. Porcentaje de relleno: 15%
  - c. Patrón de relleno: *Grid*
  - d. Estructura de soporte: *Tree*
  - e. Ángulo máximo para soportes: 60°
6. Asegurarse de que los demás parámetros estén especificados correctamente, como por ejemplo el número de extrusor a utilizar.
7. Conectar el USB a la computadora, y exportar el archivo al mismo en formato *.3mf*.
8. Extraer el USB de la computadora.
9. Asegurarse de que el material colocado en la impresora sea PETG y que el rollo tenga suficiente longitud.
10. Ingresar el USB a la impresora y seleccionar el archivo para comenzar la impresión.
11. Una vez terminada la impresión, esperar a que la pieza y la cama de la impresora enfríen lo suficiente para retirar la pieza con ayuda de la espátula de metal.
12. Retirar los restos de material de soporte.



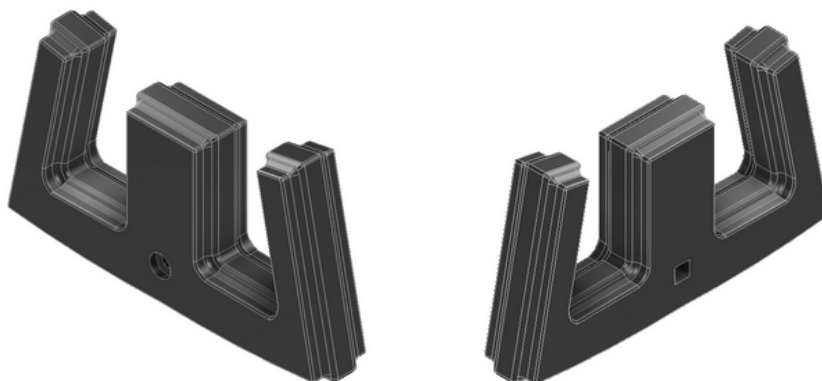
# Base potenciómetro

1. Utilizando como guía el dibujo número 11 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Diseñar la pieza en el programa *Autodesk Inventor*.
  - b. Exportarla en formato *.stl*.
2. Abrir el programa *Ultimaker Cura*.
3. Seleccionar la impresora *Ultimaker S5*.
4. Abrir el archivo de la pieza y colocarla correctamente en la cama de impresión.
5. Especificar los siguientes parámetros:
  - a. Material: PETG
  - b. Porcentaje de relleno: 15%
  - c. Patrón de relleno: *Grid*
  - d. Estructura de soporte: *Tree*
  - e. Ángulo máximo para soportes: 60°
6. Asegurarse de que los demás parámetros estén especificados correctamente, como por ejemplo el número de extrusor a utilizar.
7. Conectar el USB a la computadora, y exportar el archivo al mismo en formato *.3mf*.
8. Extraer el USB de la computadora.
9. Asegurarse de que el material colocado en la impresora sea PETG y que el rollo tenga suficiente longitud.
10. Ingresar el USB a la impresora y seleccionar el archivo para comenzar la impresión.
11. Una vez terminada la impresión, esperar a que la pieza y la cama de la impresora enfríen lo suficiente para retirar la pieza con ayuda de la espátula de metal.
12. Retirar los restos de material de soporte.



# Yugo

1. Utilizando como guía el dibujo número 12 de la sección 12.4 del trabajo:
  - a. Diseñar la pieza en el programa *Autodesk Inventor*.
  - b. Exportarla en formato *.stl*.
2. Abrir el programa *Ultimaker Cura*.
3. Seleccionar la impresora *Ultimaker S5*.
4. Abrir el archivo de la pieza y colocarla correctamente en la cama de impresión.
5. Especificar los siguientes parámetros:
  - a. Material: PETG
  - b. Porcentaje de relleno: 25%
  - c. Patrón de relleno: *Grid*
  - d. Estructura de soporte: *Tree*
  - e. Ángulo máximo para soportes: 60°
6. Asegurarse de que los demás parámetros estén especificados correctamente, como por ejemplo el número de extrusor a utilizar.
7. Conectar el USB a la computadora, y exportar el archivo al mismo en formato *.3mf*.
8. Extraer el USB de la computadora.
9. Asegurarse de que el material colocado en la impresora sea PETG y que el rollo tenga suficiente longitud.
10. Ingresar el USB a la impresora y seleccionar el archivo para comenzar la impresión.
11. Una vez terminada la impresión, esperar a que la pieza y la cama de la impresora enfríen lo suficiente para retirar la pieza con ayuda de la espátula de metal.
12. Retirar los restos de material de soporte.



---

# **ENSAMBLE**

---

# HERRAMIENTAS A UTILIZAR

---

- 1x destornillador tipo Phillips.



- 1x set de llaves Allen.



- 1x set de *ratchet* con copas.



- 1x calibrador vernier.



- 1x torquímetro.

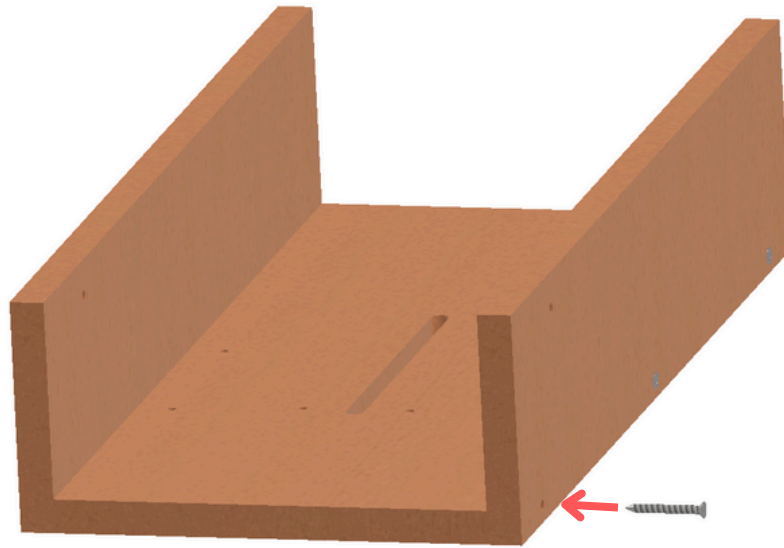


# PROCEDIMIENTO

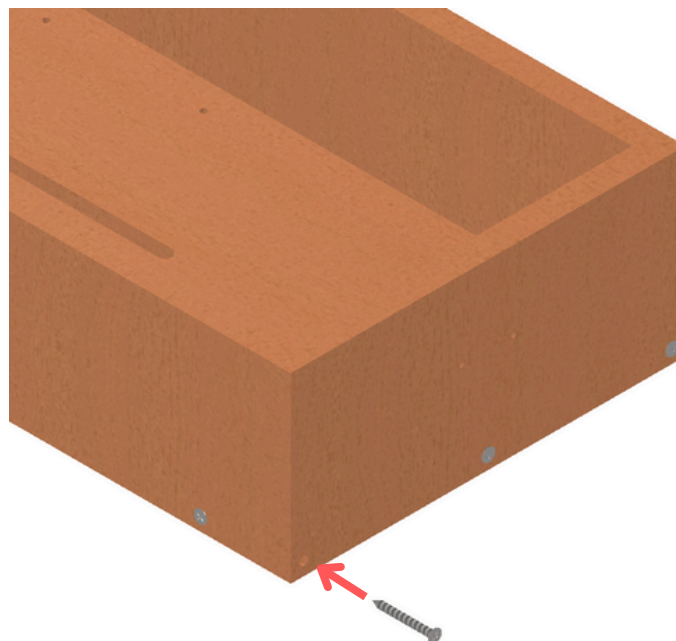
---

Con los materiales proporcionados, se procede a ensamblar el sistema de yugo.

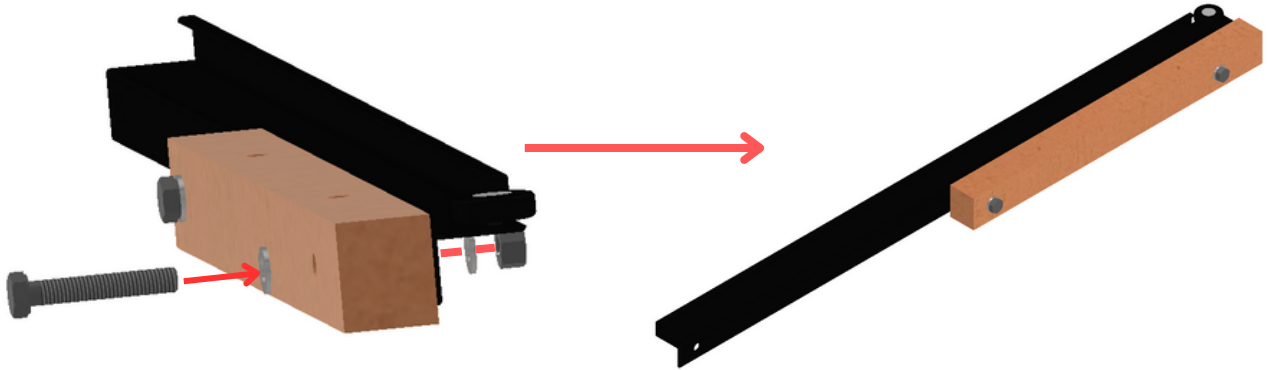
1. Con el desatornillador tipo *Phillips* y 6 tornillos para madera de diámetro 3/8" x 1 1/2", atornillar las paredes laterales a la base primaria, asegurando que la base primaria esté orientada correctamente. Utilizando el torquímetro, apretar los tornillos a 4.5 Nm.



2. Con el desatornillador tipo *Phillips* y 3 tornillos para madera de 3/8" x 1 1/2", atornillar la pared posterior a la base primaria. Utilizando el torquímetro, apretar los tornillos a 4.5 Nm.

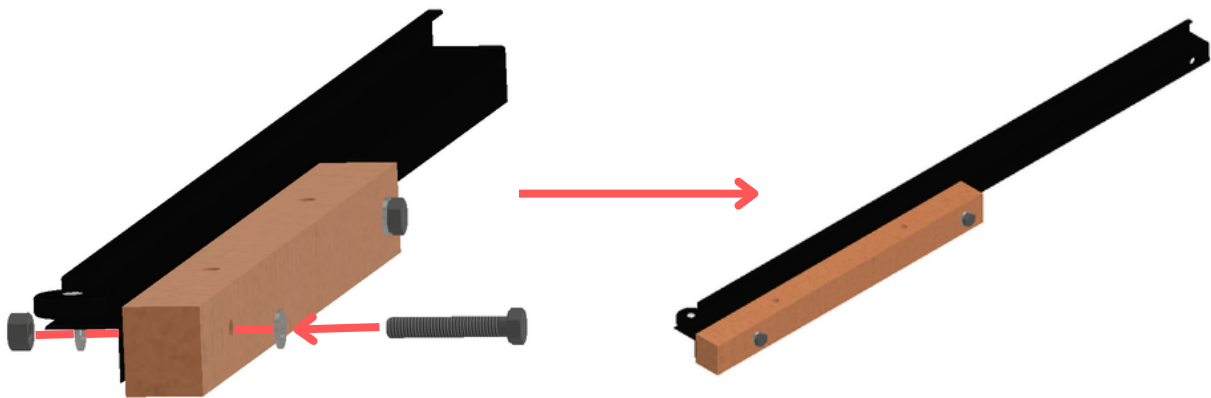


3. Con una llave *Allen* de 5 mm, 2 tornillos M5 x 30 mm con cabeza *Allen*, 2 tuercas hexagonales M5 y 2 arandelas, unir la corredera inferior izquierda a uno de los soportes, utilizando el torquímetro para apretar los tornillos a 7.45 Nm.

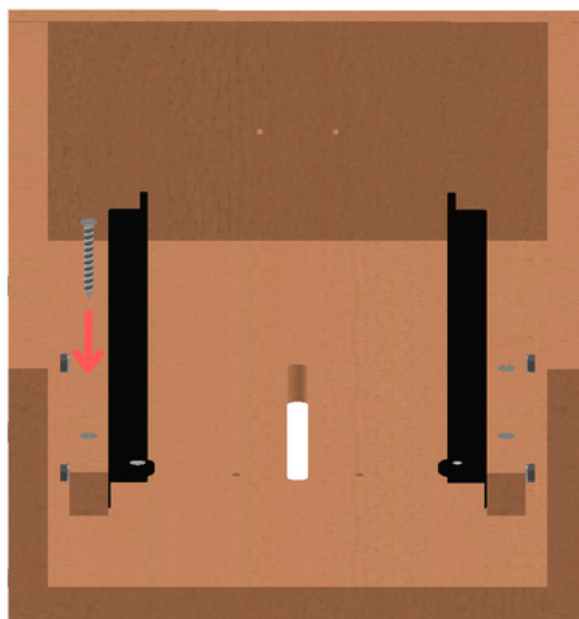


Act

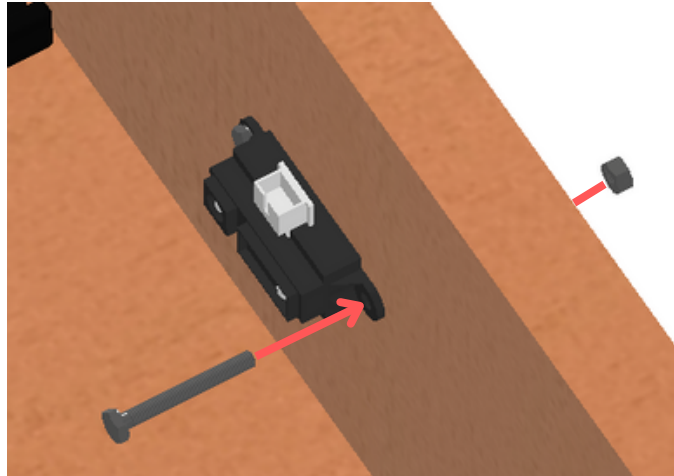
4. Con una llave *Allen* de 5 mm, 2 tornillos M5 x 30 mm con cabeza *Allen*, 2 tuercas hexagonales M5 y 2 arandelas, unir la corredera inferior derecha al soporte restante, utilizando el torquímetro para apretar los tornillos a 7.45 Nm.



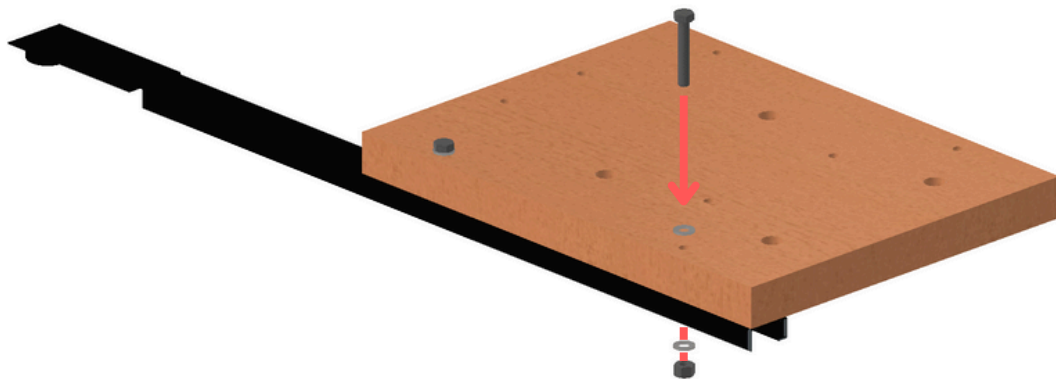
5. Con el desatornillador tipo *Phillips* y 4 tornillos para madera de 1/4" x 1/2", atornillar ambos soportes con correderas a la base principal, utilizando el torquímetro para apretar los tornillos a 4.5 Nm.



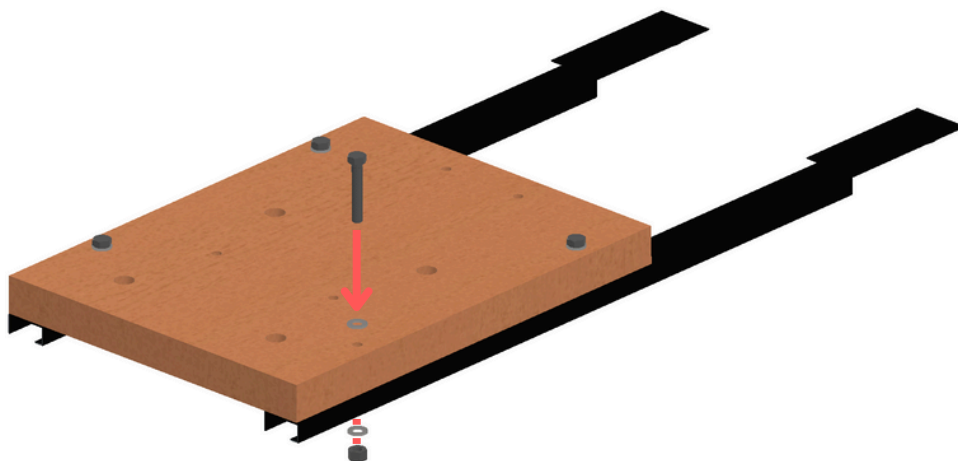
6. Con una llave *Allen* de 3 mm, 2 tornillos M3 x 25 mm con cabeza *Allen* y 2 tuercas M3, anclar el sensor de distancia a la pared posterior, asegurando que quede orientado correctamente. Utilizando el torquímetro, apretar los tornillos a 1.5 Nm.



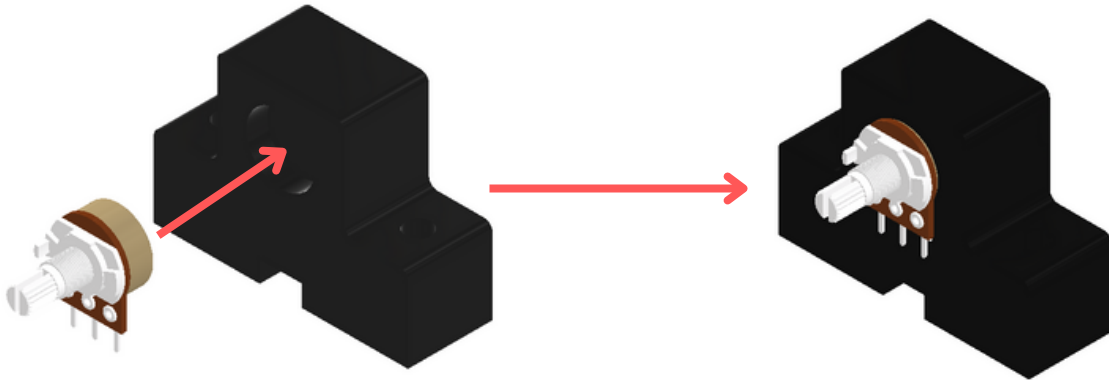
7. Con una llave *Allen* de 5 mm, 2 tornillos M5 x 30 mm con cabeza *Allen*, 2 tuercas M5 y 2 arandelas, unir la corredera superior izquierda a la base secundaria, asegurando que esté orientada correctamente. Utilizando el torquímetro, apretar los tornillos a 7.45 Nm.



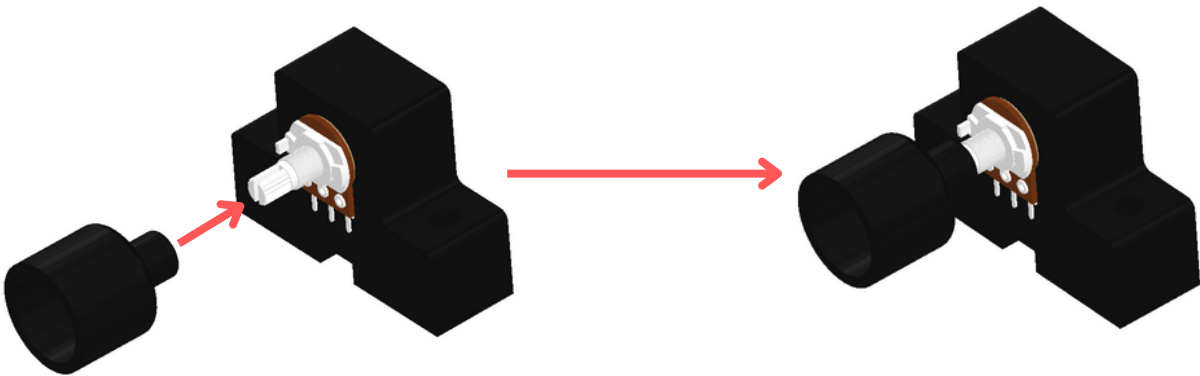
8. Con una llave *Allen* de 5 mm, 2 tornillos M5 x 30 mm con cabeza *Allen*, 2 tuercas M5 y 2 arandelas, unir la corredera superior derecha a la base secundaria, asegurando que esté orientada correctamente. Utilizando el torquímetro, para apretar los tornillos a 7.45 Nm.



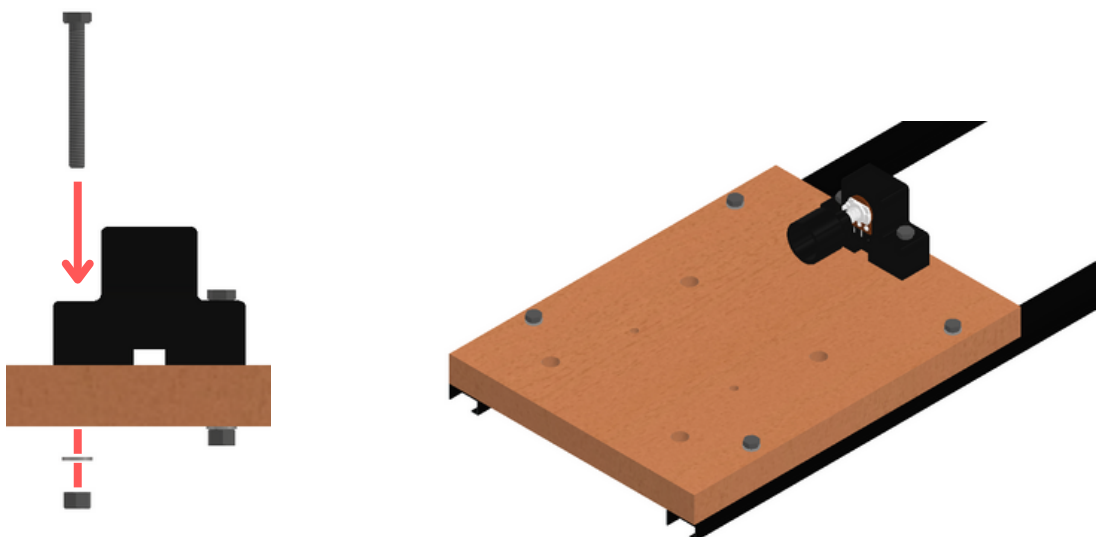
9. Insertar a presión el potenciómetro en su base, asegurando que quede orientado correctamente.



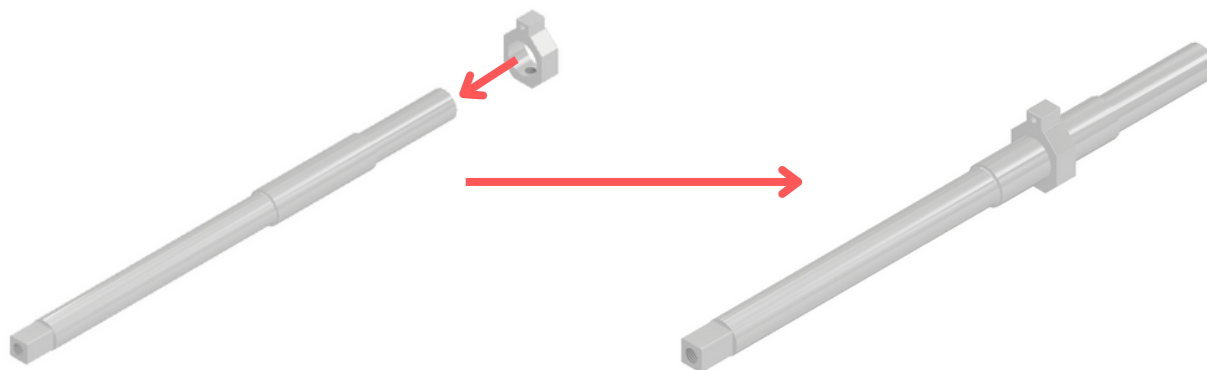
10. Insertar a presión el conector eje-potenciómetro en la perilla del potenciómetro, asegurando que esta esté en su posición 0.



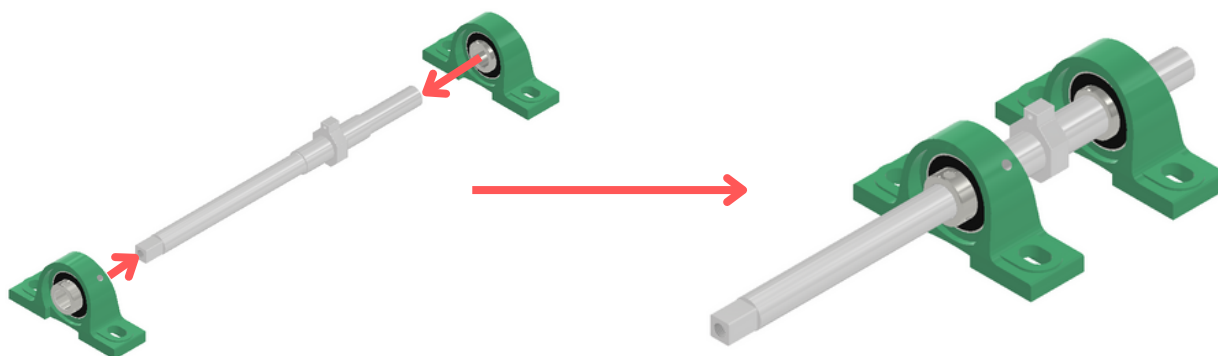
11. Con una llave *Allen* de 5 mm, 2 tornillos M5 x 45 mm con cabeza *Allen*, 2 tuercas M5 y 2 arandelas, unir la base con el potenciómetro y conector eje-potenciómetro a la base secundaria, utilizando el torquímetro para apretar los tornillos a 7.45 Nm.



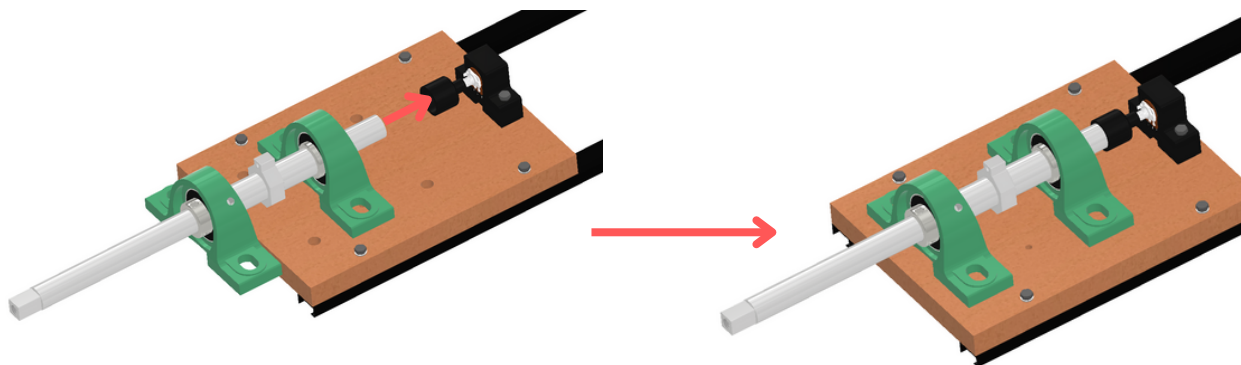
12. Colocar el conector central en el medio de la sección principal del eje, asegurando que quede alineado a 90° respecto a una de las caras de la sección del eje donde se inserta el yugo. Luego, con una llave Allen de 1/4", apretar la castigadera para que el conector quede en su lugar. Utilizando el torquímetro, apretar la castigadera a 15 Nm.



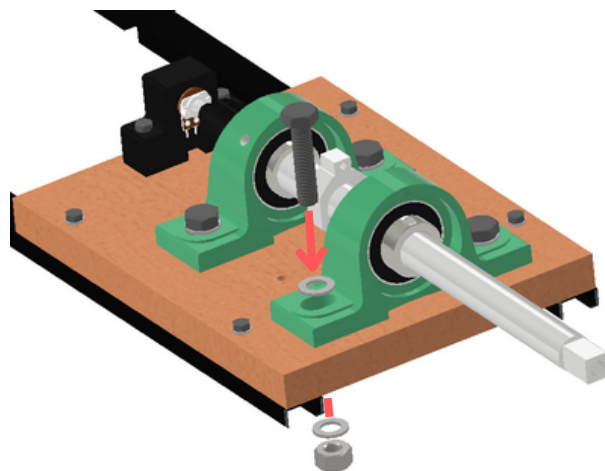
13. Ingresar ambas chumaceras en las secciones correspondientes del eje, asegurando que los rodamientos encajen en los hombros. Utilizando una llave Allen de 1/4", apretar la castigadera de ambos rodamientos para que las chumaceras queden fijas en su lugar. Utilizando el torquímetro, apretar las castigaderas a 15 Nm.



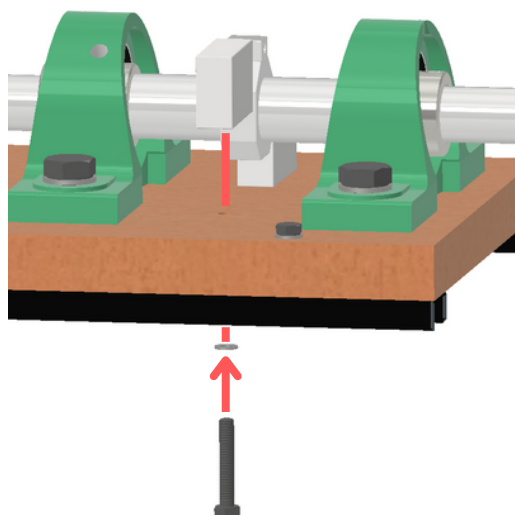
14. Insertar a presión el eje con las chumaceras en el conector eje-potenciómetro.



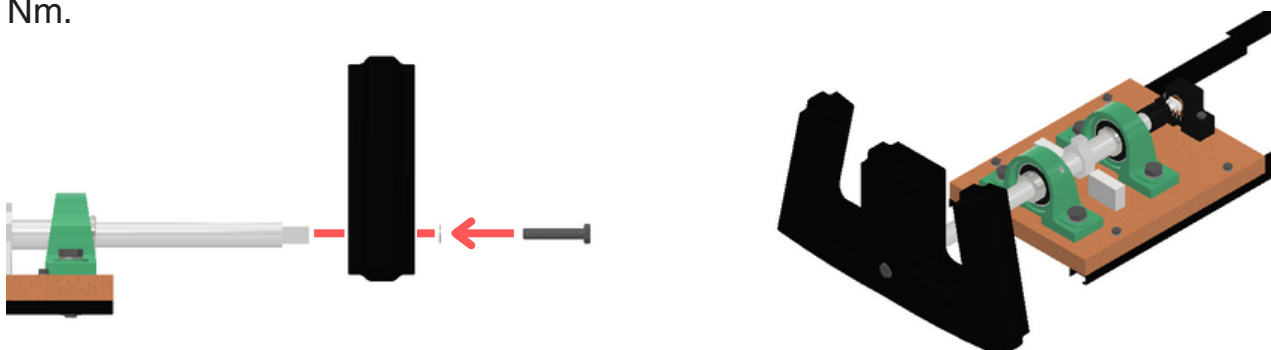
15. Utilizando 1 *ratchet*, 1 copa M10, 4 tornillos M10 x 45 mm con cabeza hexagonal, 4 tuercas M10 y 8 arandelas, unir las chumaceras a la base secundaria, utilizando el torquímetro para apretar los tornillos a 10 Nm.



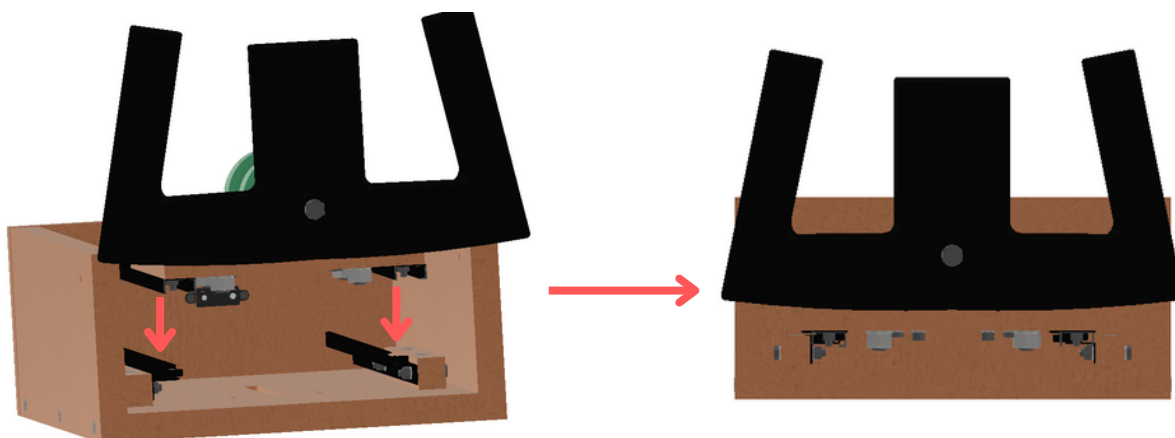
16. Utilizando 1 llave *Allen* de 5 mm, 2 tornillos M5 x 30 mm con cabeza *Allen* y 2 arandelas, unir ambas placas de contacto a la base secundaria, asegurando que estén orientadas correctamente. Utilizando el torquímetro, apretar los tornillos a 7.45 Nm.



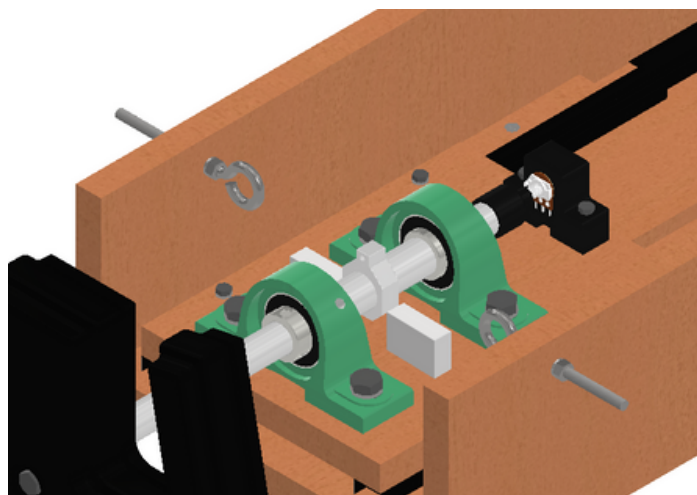
17. Utilizando 1 ratchet, 1 copa M8 y 1 tornillo M8 x 35 mm con cabeza hexagonal, unir el yugo al eje, utilizando el torquímetro para apretar el tornillo a 8 Nm.



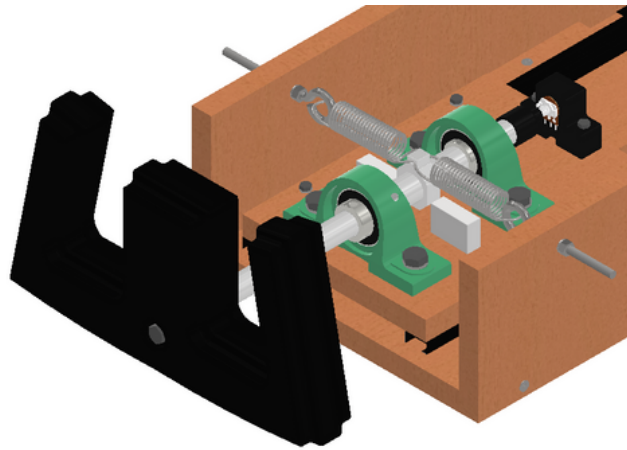
18. Encajar las correderas superiores con las correderas inferiores y verificar que el desplazamiento al empujar y jalar sea correcto.

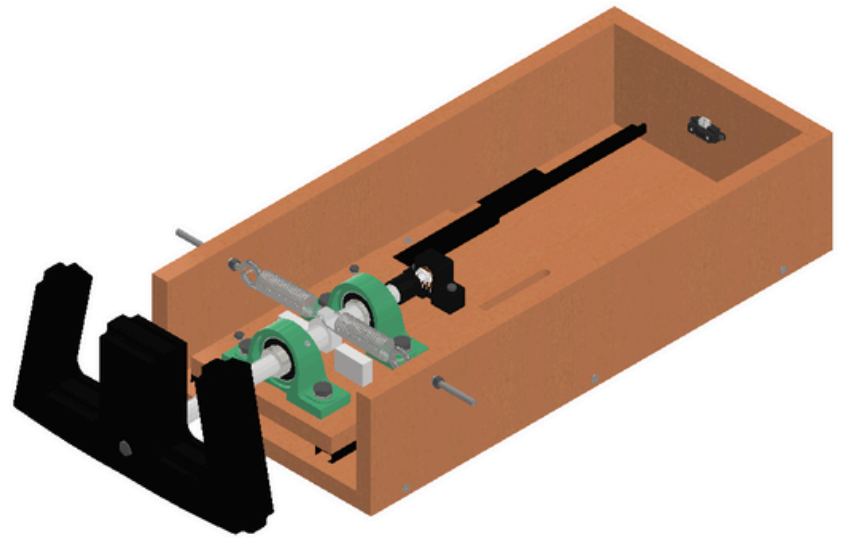


19. Utilizando 4 tuercas de 1/4" y 4 arandelas, unir ambos sujetadores de resortes a las paredes laterales, asegurando que estén orientados correctamente.



20. Por último, anclar ambos resortes tanto a los sujetadores como al conector central.





# MANUAL DE USO

SISTEMA DE YUGO PARA  
SIMULADOR DE VUELO

---

# ÍNDICE

---

Introducción .....	1
Uso .....	2
Empuje .....	2
Jalado .....	3
Giro hacia la izquierda .....	3
Giro hacia la derecha .....	4

# INTRODUCCIÓN

---

Este manual está diseñado para guiar al usuario en el correcto manejo del sistema de yugo para simulador de vuelo. El sistema simula los movimientos clave que se realizan durante un vuelo real, específicamente el empuje, el jalado y el giro. A lo largo de este manual, se describirá qué ocurre al realizar cada movimiento, cómo interactúan los componentes, y qué respuestas esperar.

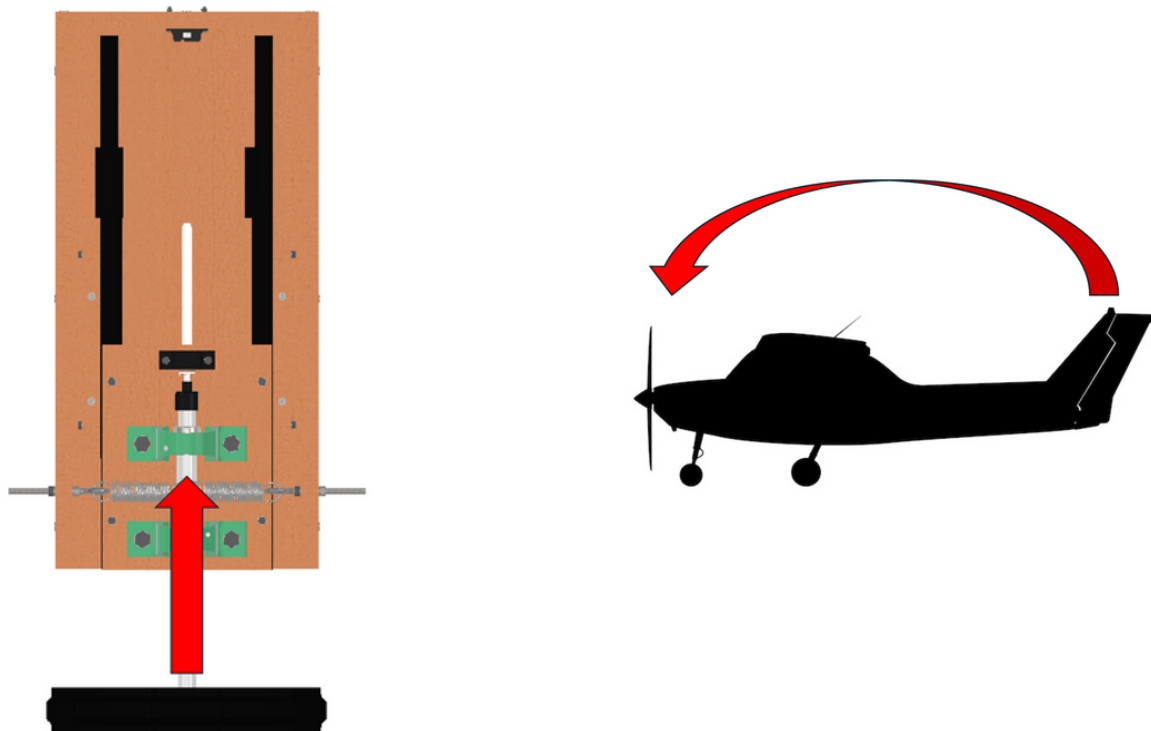
# USO

---

Luego de fijar el sistema de yugo en la estructura del simulador de vuelo y de realizar las conexiones del potenciómetro y el sensor de distancia a la computadora, como se indica en el módulo de la interfaz, la manera de utilizar el yugo durante una simulación depende de tres movimientos: empuje, jalado y giro. El sensor de distancia mide el desplazamiento longitudinal controlando la posición de la base en la que se encuentra el potenciómetro. Durante el empuje, mide cuánto se acerca la base al sensor para replicar la distancia exacta en el simulador. En el jalado, mide cuánto se aleja la base del sensor, cumpliendo la misma función. Por otro lado, el giro se mide mediante un potenciómetro anclado al eje y, por ende, al yugo. Al estar inicialmente en su posición 0, este registra el ángulo en el que se encuentra el yugo y envía esta información para replicarse en la simulación.

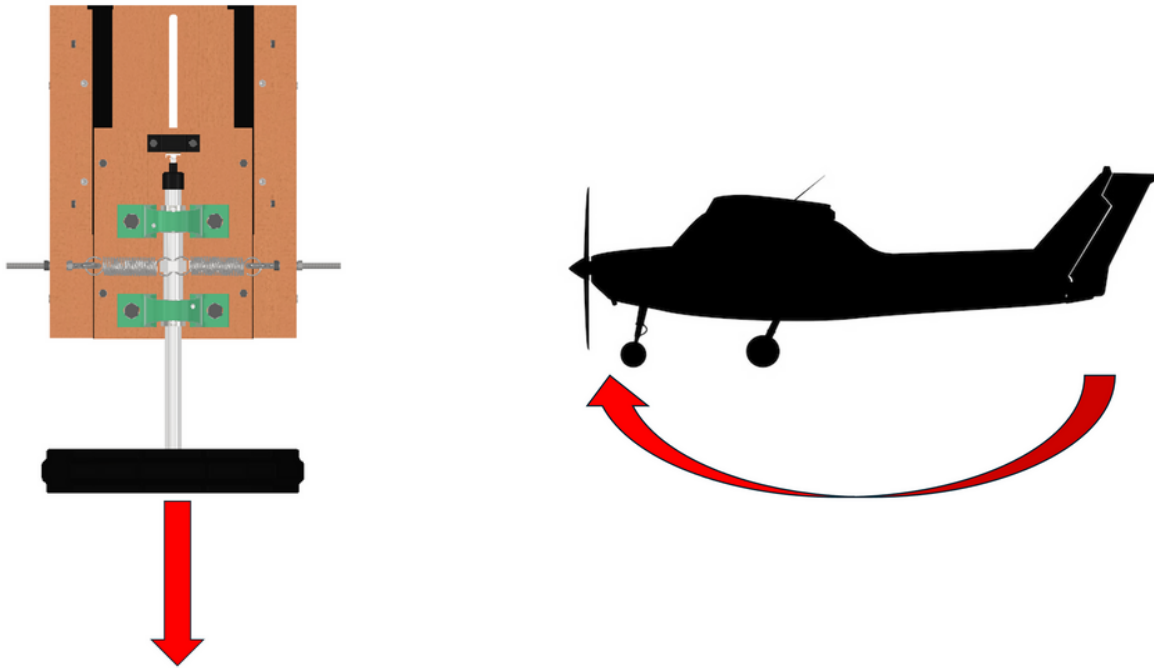
## Empuje

Al empujar el yugo, el elevador de la aeronave se inclinará hacia abajo, causando que esta se dirija hacia tierra.



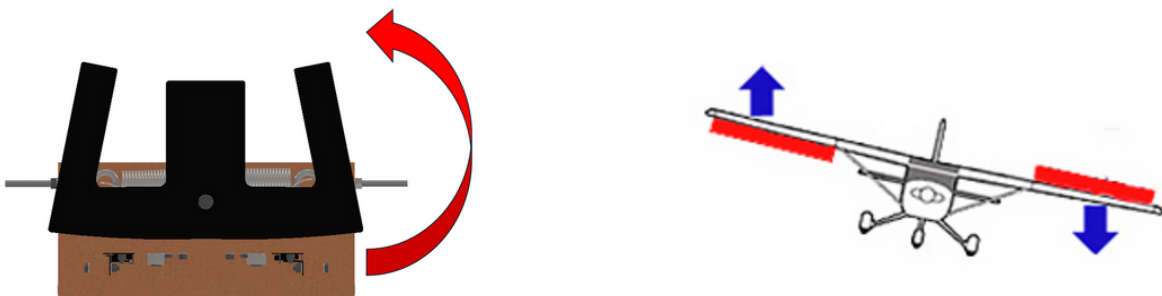
# Jalado

Al jalar el yugo, el elevador de la aeronave se inclinará hacia arriba, causando que esta se dirija hacia el cielo.



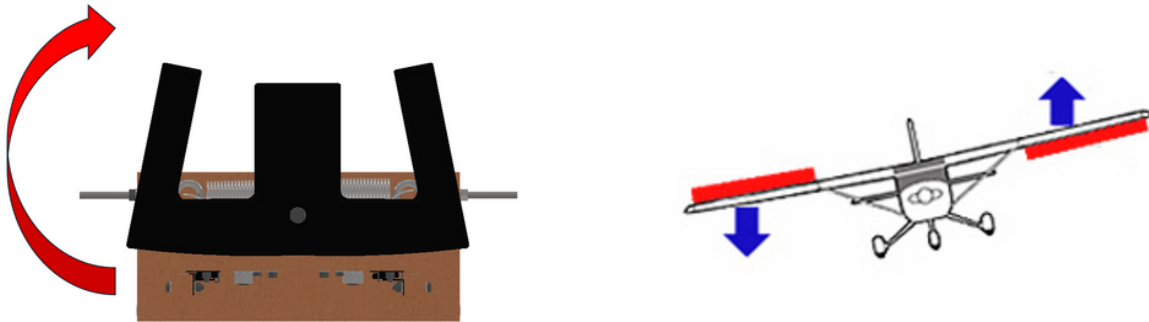
# Giro hacia la izquierda

Al girar el yugo hacia la izquierda, el alerón izquierdo de la aeronave se inclinará hacia arriba, mientras que el derecho hacia abajo, causando que esta se incline hacia la izquierda sobre su eje transversal.



# Giro hacia la derecha

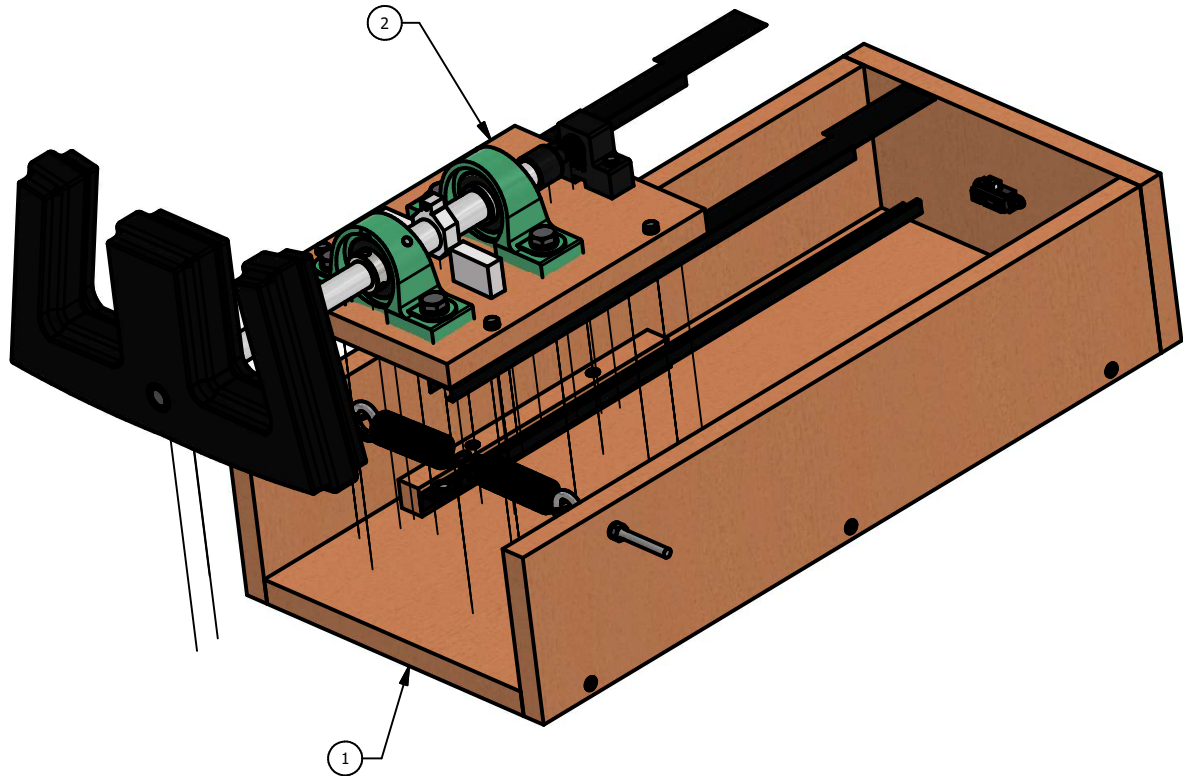
Al girar el yugo hacia la derecha, el alerón derecho de la aeronave se inclinará hacia arriba, mientras que el izquierdo hacia abajo, causando que esta se incline hacia la derecha sobre su eje transversal.



2

1

LISTADO DE PARTES				
PARTE	CANT.	NÚMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	BASE PRIMARIA CON COMPONENTES	ESPESOR de 3/4"	MADERA DE PINO
2	1	BASE SECUNDARIA CON COMPONENTES	ESPESOR de 3/4"	MADERA DE PINO



TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ± N/A
	.XX ± N/A
	.XXX ± N/A
ANGULAR	± N/A

DIBUJADO POR  
**N. MACVEAN**  
FECHA  
**24/09/2024**

DISEÑADO POR  
**N. MACVEAN**  
FECHA  
**24/09/2024**

REVISADO POR  
**L. D. Castañeda**  
FECHA  
**02/10/2024**

APROBADO POR  
**L. D. Castañeda**  
FECHA  
**02/10/2024**

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO  
**YUGO SIMULADOR DE VUELO**

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

**UVG** UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III  
Guatemala, Guatemala 01015  
PBX: (502) 2634-0336 / 40  
mac20145@uvg.edu.gt

TÍTULO: **Sistema de yugo**

NÚMERO DE DIBUJO: 1

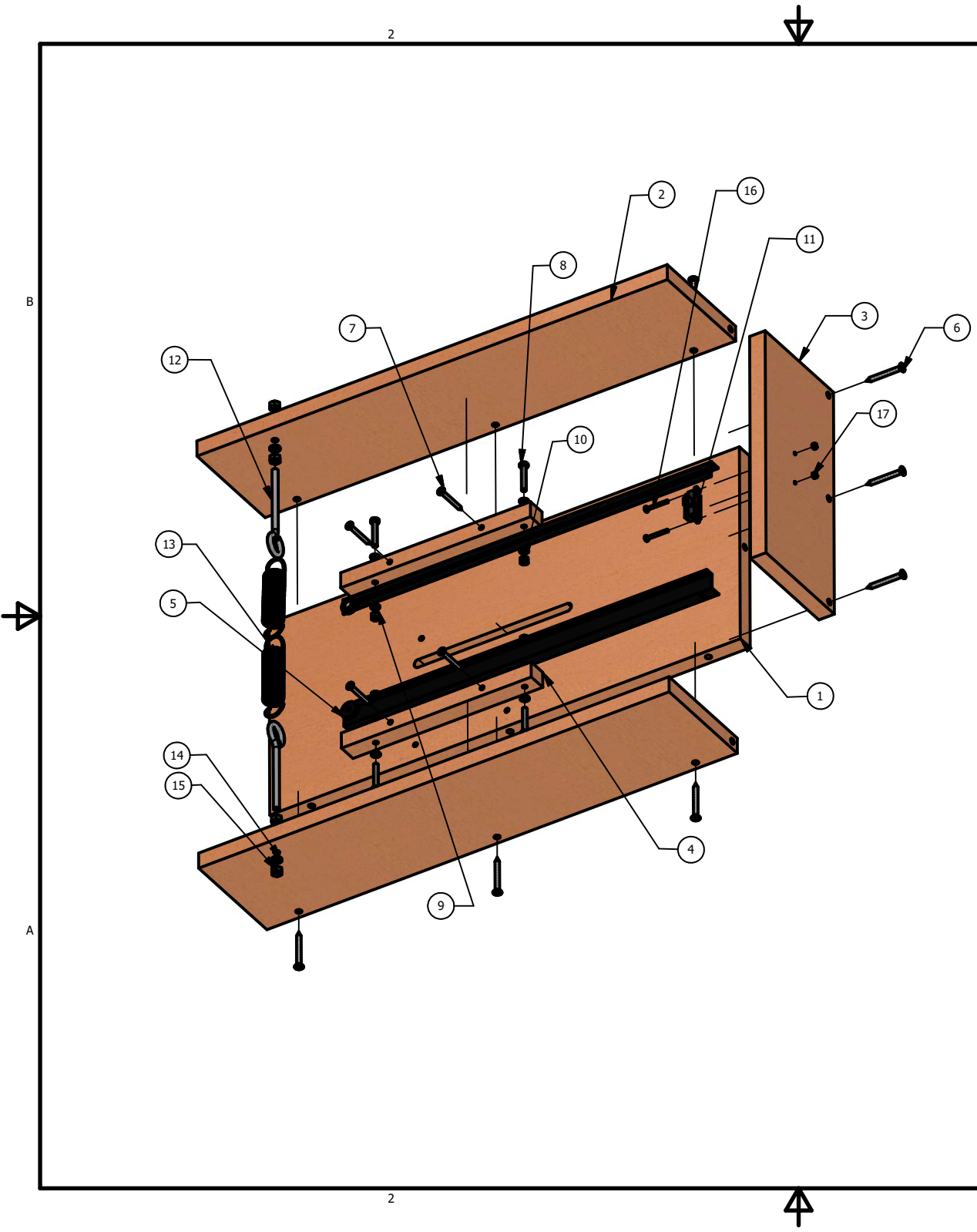
FORMATO <b>A</b>	ESCALA: <b>1 : 5</b>	UNIDADES: mm
	PÁGINA 1 DE 14	REV <b>A</b>

MATERIAL <b>VER LISTADO</b>
TRATAMIENTO <b>N/A</b>
MASA: <b>N/A</b>



2

1

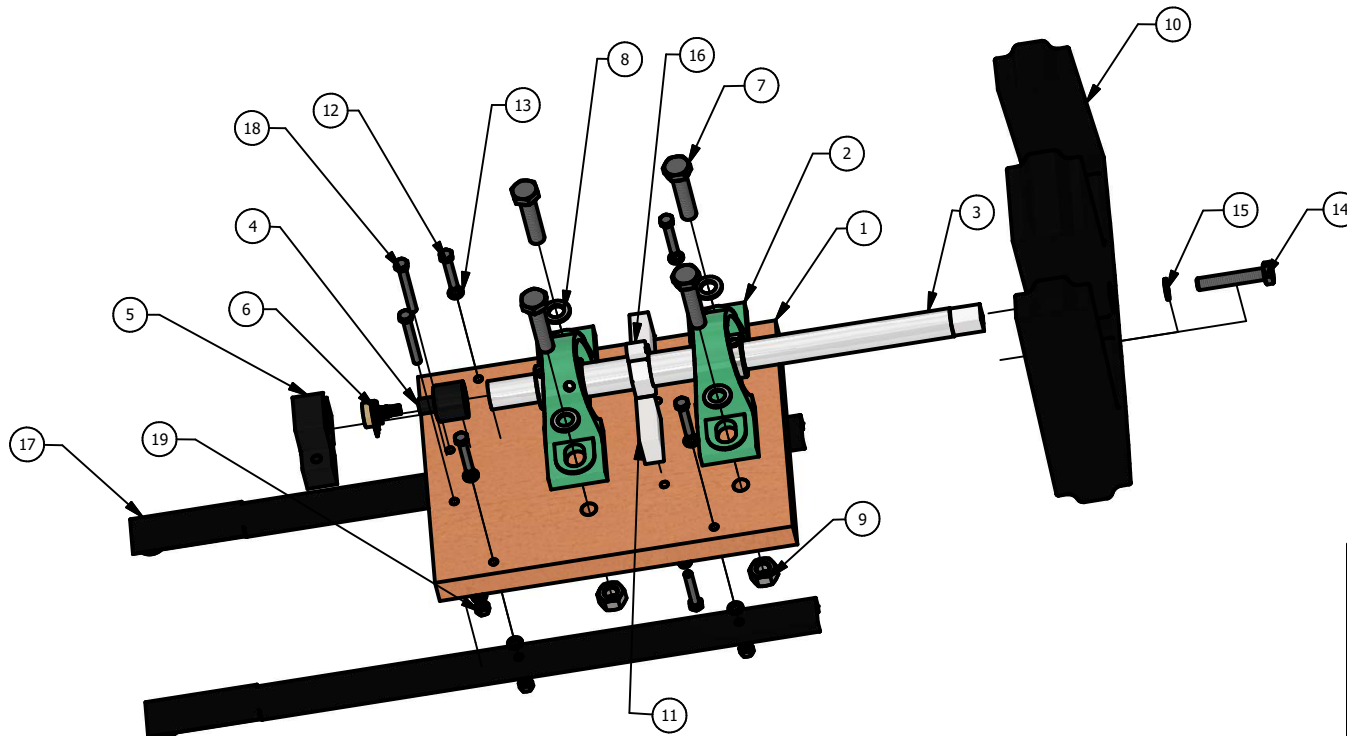


LISTADO DE PARTES				
PARTE	CANT.	NÚMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	BASE PRIMARIA	ESPESOR DE DE 3/4"	MADERA DE PINO
2	2	PARED LATERAL	ESPESOR DE DE 3/4"	MADERA DE PINO
3	1	PARED POSTERIOR	ESPESOR DE DE 3/4"	MADERA DE PINO
4	2	SOPORTE PARA CORREDERA	ESPESOR DE DE 3/4"	MADERA DE PINO
5	2	CORREDERA INFERIOR	LONGITUD DE 450 MM	ALUMINIO
6	9	TORNILLO PARA MADERA	DIÁMETRO DE 1/4" Y LONGITUD DE 1 1/2"	ZINC
7	4	TORNILLO PARA MADERA	DIÁMETRO DE 3/8" Y LONGITUD DE 1 1/2"	ZINC
8	4	TORNILLO GRADO 8.8 DE CABEZA ALLEN	DIÁMETRO M5 Y LONGITUD DE 30 MM	HIERRO NEGRO
9	8	ARANDELA PLANA	DIÁMETRO M5	ZINC
10	4	TUERCA HEXAGONAL	DIÁMETRO M5	HIERRO NEGRO
11	1	SENSOR DE DISTANCIA	SHARP GP2Y0A21YK0F	N/A
12	2	SUJETADOR DE RESORTE	DIÁMETRO DE 1/4" Y LONGITUD DE 1 1/2"	ACERO INOXIDABLE
13	2	RESORTE DE TENSIÓN	8 X 10 X 34 MM, k = 1.68 N / mm	ACERO INOXIDABLE
14	4	ARANDELA PLANA	DIÁMETRO DE 1/4"	ZINC
15	4	TUERCA HEXAGONAL	DIÁMETRO DE 1/4"	ACERO INOXIDABLE
16	2	TORNILLO GRADO 8.8 DE CABEZA ALLEN	DIÁMETRO M3 Y LONGITUD DE 25 MM	HIERRO NEGRO
17	2	TUERCA HEXAGONAL	DIÁMETRO M3	HIERRO NEGRO

TÍTULO: <b>BASE PRIMARIA CON COMPONENTES</b>		
NÚMERO DE DIBUJO: 2		
FORMATO	ESCALA: 1 : 5	UNIDADES: MM
<b>A</b>	PÁGINA 2 DE 14	REV <b>A</b>

## LISTADO DE PARTES

PARTE	CANT.	NÚMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	BASE SECUNDARIA	ESPESOR DE 3/4"	MADERA DE PINO
2	2	CHUMACERA	RODAMIENTO AUTO-ALINEABLE DE BOLAS NTN UC204-012 Y CARCASA NTN P203J	N/A
3	1	EJE	LONGITUD DE 330.2 MM Y DIÁMETRO MÁXIMO DE 22.225 MM	ALUMINIO 6061
4	1	CONECTOR EJE-POTENCIÓMETRO	N/A	PETG
5	1	BASE POTENCIÓMETRO	N/A	PETG
6	1	POTENCIÓMETRO	10 KILO OHM CON GIRO DE 180°	N/A
7	4	TORNILLO DE CABEZA HEXAGONAL GRADO 8.8	DIÁMETRO M10 Y LONGITUD DE 45 MM	HIERRO NEGRO
8	8	ARANDELA PLANA	DIÁMETRO M10	ZINC
9	4	TUERCA HEXAGONAL	DIÁMETRO M10	ACERO INOXIDABLE
10	1	YUGO	N/A	PETG
11	2	PLACA DE CONTACTO	ESPESOR DE 1/2"	ALUMINIO 6061
12	6	TORNILLO GRADO 8.8 DE CABEZA ALLEN	DIÁMETRO M5 Y LONGITUD DE 30 MM	HIERRO NEGRO
13	16	ARANDELA PLANA	DIÁMETRO M5	ZINC
14	1	TORNILLO GRADO 8.8 DE CABEZA ALLEN	DIÁMETRO M8 Y LONGITUD DE 45 MM	HIERRO NEGRO
15	1	ARANDELA PLANA	DIÁMETRO M8	ZINC
16	1	CONECTOR CENTRAL	N/A	ALUMINIO 6061
17	2	CORREDERA SUPERIOR	LONGITUD DE 450 MM	ALUMINIO
18	2	TORNILLO GRADO 8.8 DE CABEZA ALLEN	DIÁMETRO M5 Y LONGITUD DE 45 MM	HIERRO NEGRO
19	6	TUERCA HEXAGONAL	DIÁMETRO M5	HIERRO NEGRO



TÍTULO: **BASE SECUNDARIA  
CON COMPONENTES**

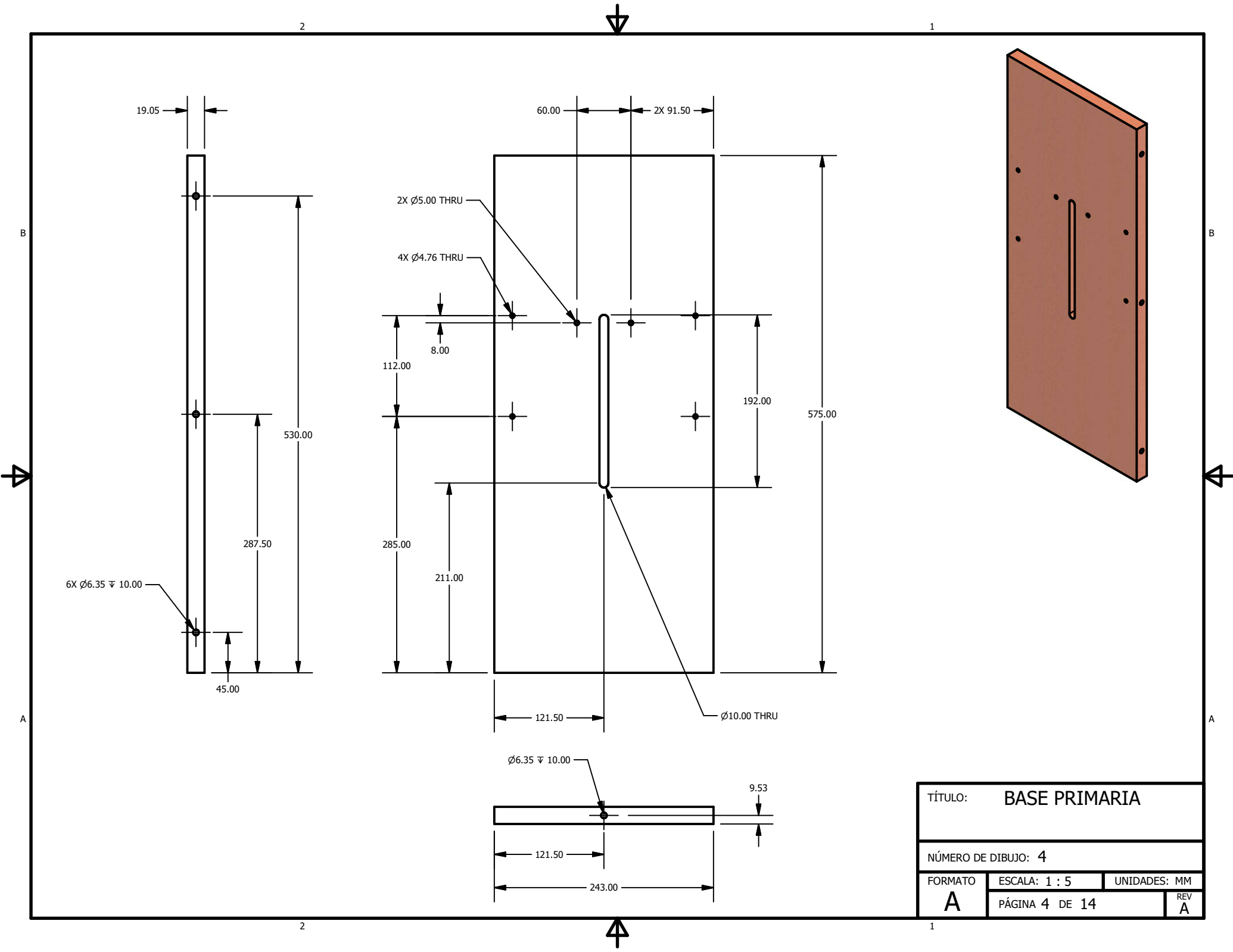
NÚMERO DE DIBUJO: 3

FORMATO ESCALA: 1 : 5 UNIDADES: MM

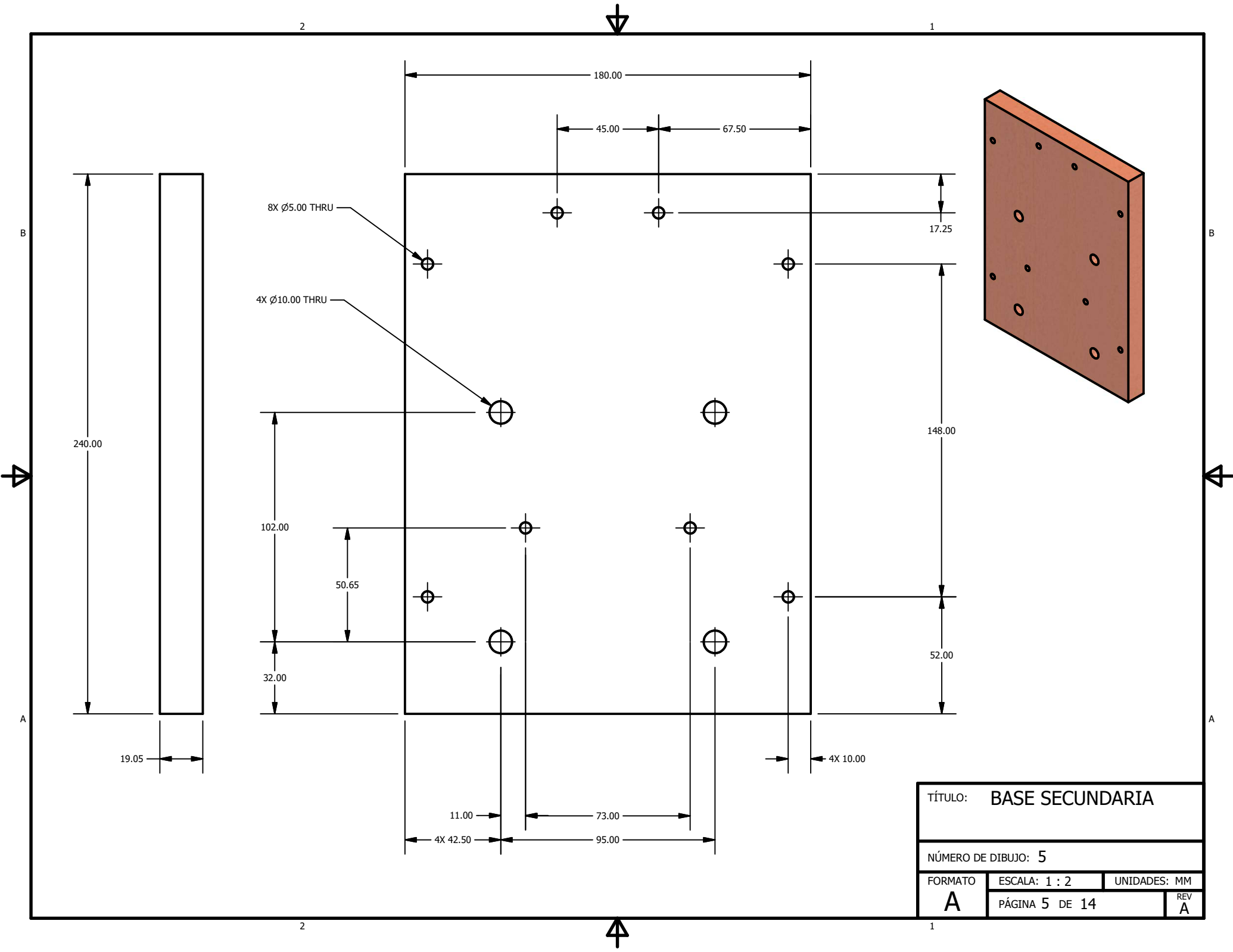
A

PÁGINA 3 DE 14

REV  
A



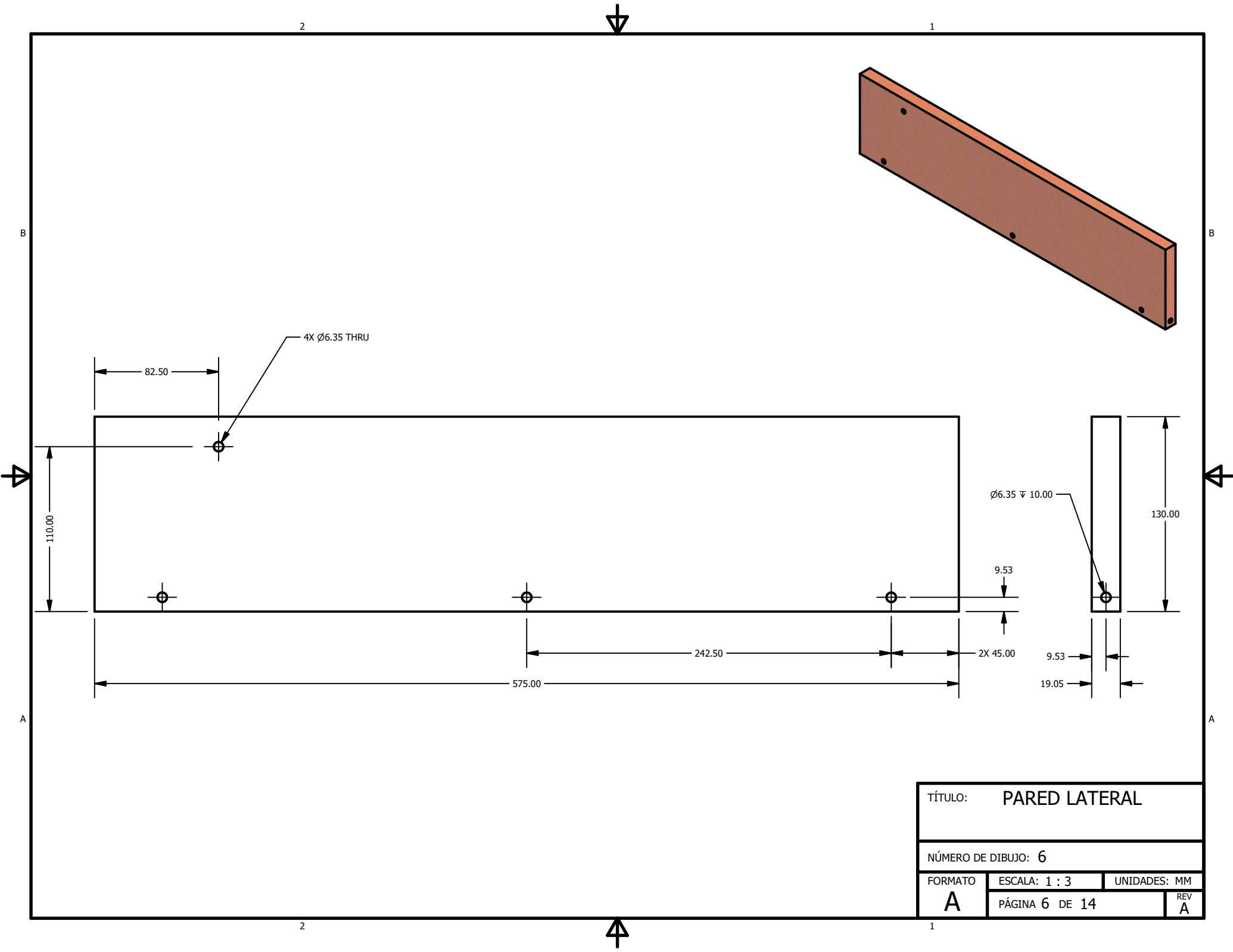
TÍTULO: <b>BASE PRIMARIA</b>		
NÚMERO DE DIBUJO: 4		
FORMATO	ESCALA: 1 : 5	UNIDADES: MM
<b>A</b>	PÁGINA 4 DE 14	REV <b>A</b>



TÍTULO: BASE SECUNDARIA

NÚMERO DE DIBUJO: 5

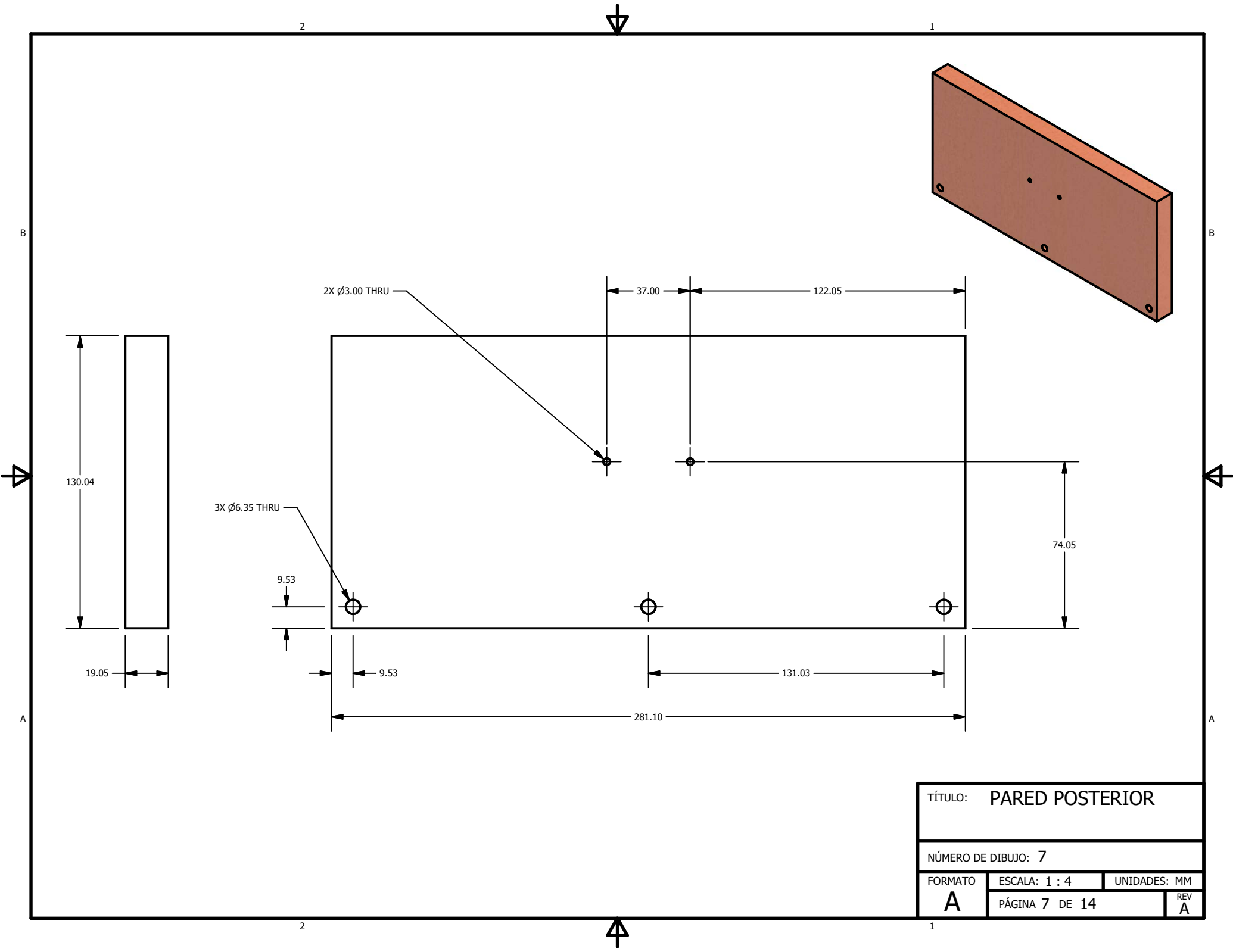
FORMATO	ESCALA: 1 : 2	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 5 DE 14	REV A



TÍTULO: PARED LATERAL

NÚMERO DE DIBUJO: 6

FORMATO	ESCALA: 1 : 3	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 6 DE 14	REV A



TÍTULO: PARED POSTERIOR

NÚMERO DE DIBUJO: 7

FORMATO	ESCALA: 1 : 4	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 7 DE 14	REV A

2

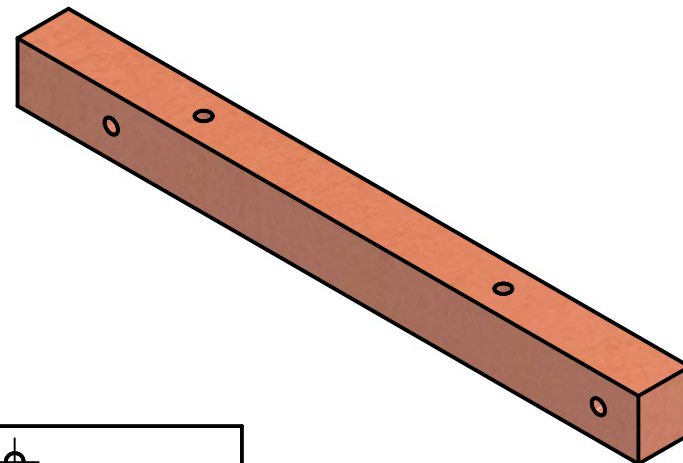
1

2

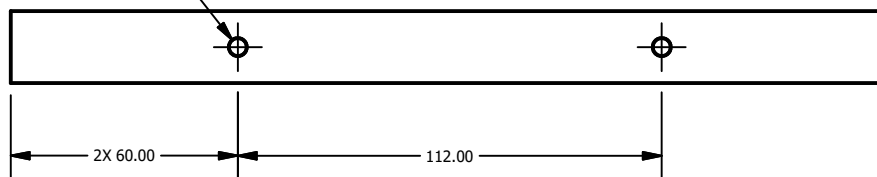
1

B

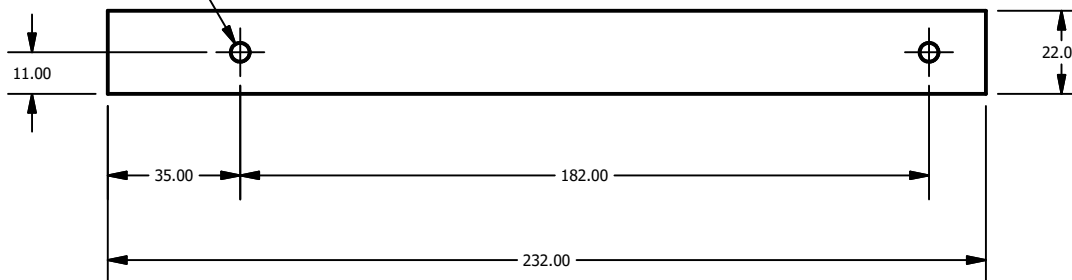
B



2X Ø6.35 THRU



2X Ø5.00 THRU



19.05



A

A

2

1

TÍTULO: <b>SOPORTE PARA CORREDERA</b>		
NÚMERO DE DIBUJO: <b>8</b>		
FORMATO	ESCALA: <b>1 : 2</b>	UNIDADES: <b>MM</b>
<b>A</b>	PÁGINA <b>8</b> DE <b>14</b>	REV <b>A</b>

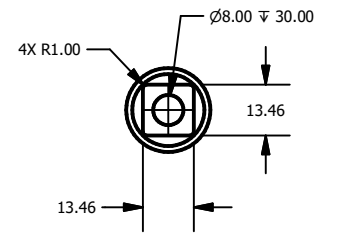
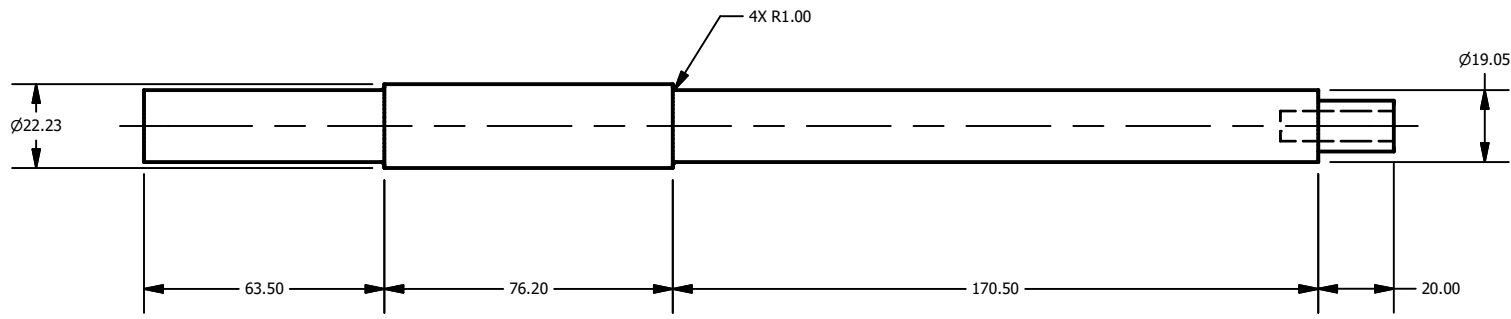
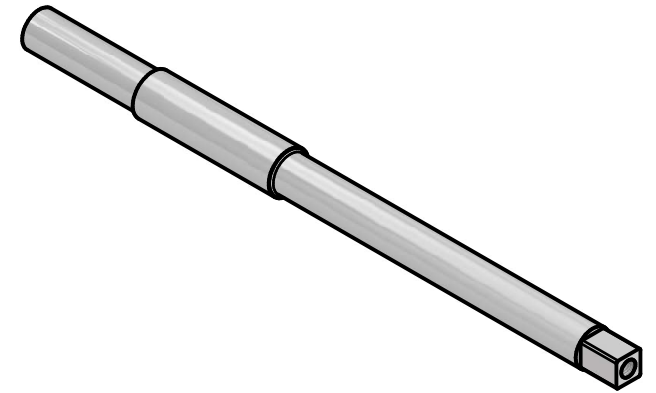


2

1

B

B



A

A

TÍTULO: EJE		
NÚMERO DE DIBUJO: 9		
FORMATO	ESCALA: 1 : 2	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 9 DE 14	REV A

2

1

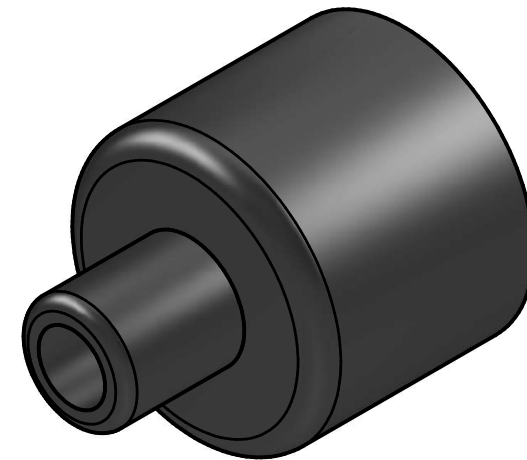


2



1

B



B

R2.00

R1.00

Ø6.20 ± 8.00

Ø19.25 ± 15.00

Ø10.20

Ø24.25

VISTA FRONTAL

11.00

20.00

A

A

TÍTULO: CONECTOR		
EJE - POTENCIÓMETRO		
NÚMERO DE DIBUJO: 10		
FORMATO	ESCALA: 2 : 1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 10 DE 14	REV A

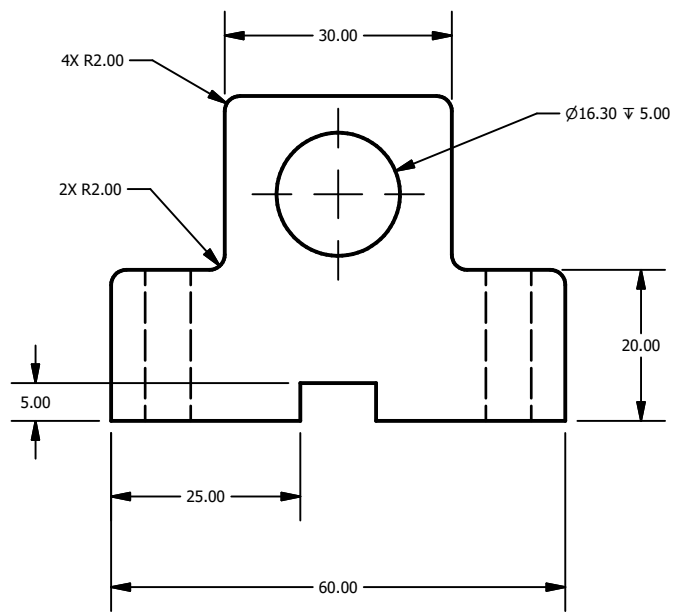
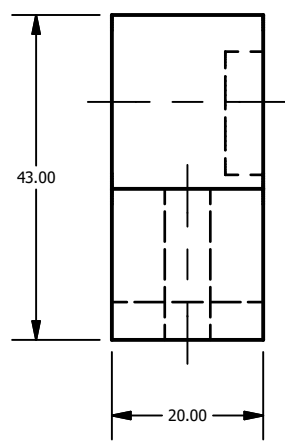
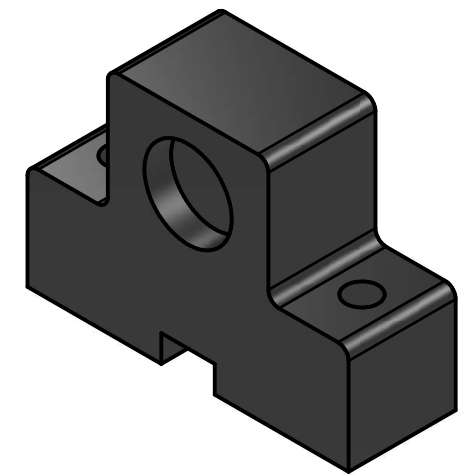
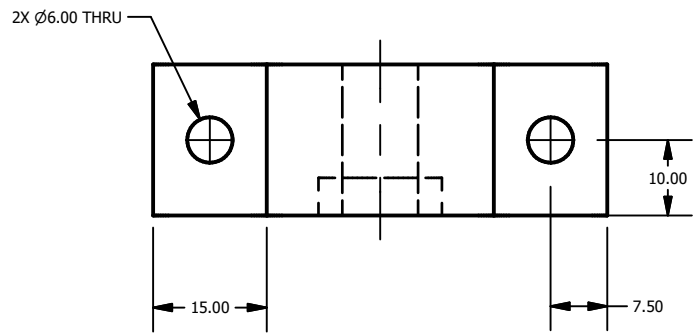
2



1

2

1



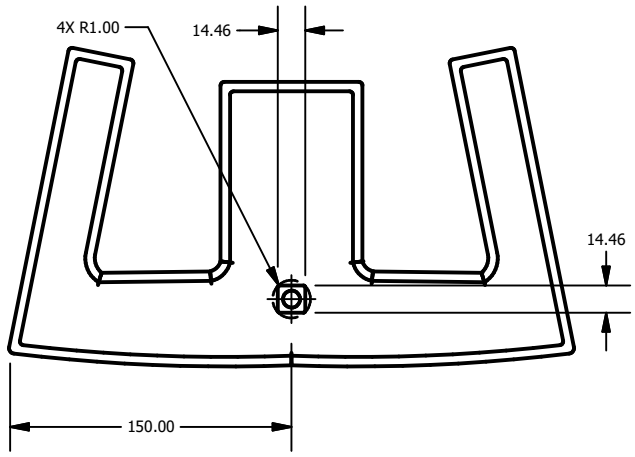
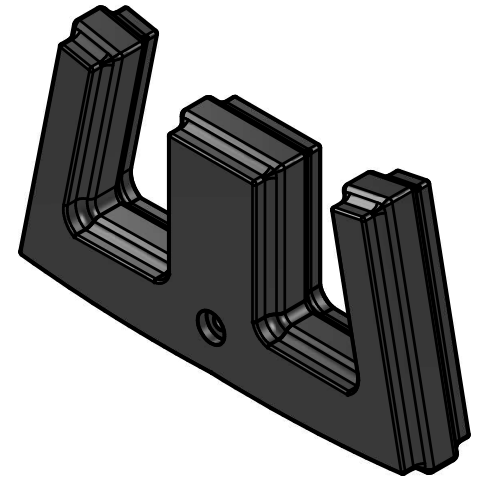
2

1

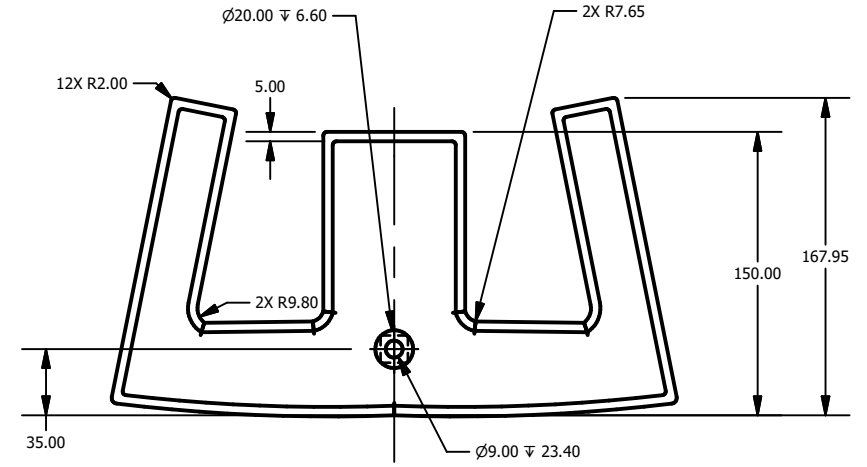
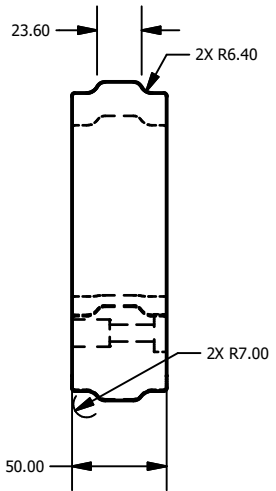
TÍTULO: <b>BASE</b>		
POTENCIÓMETRO		
NÚMERO DE DIBUJO: 11		
FORMATO	ESCALA: 1 : 1	UNIDADES: MM
<b>A</b>	PÁGINA 11 DE 14	REV <b>A</b>

2

1



VISTA POSTERIOR



2

1

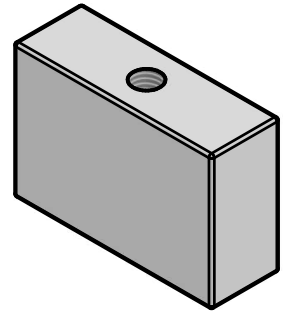
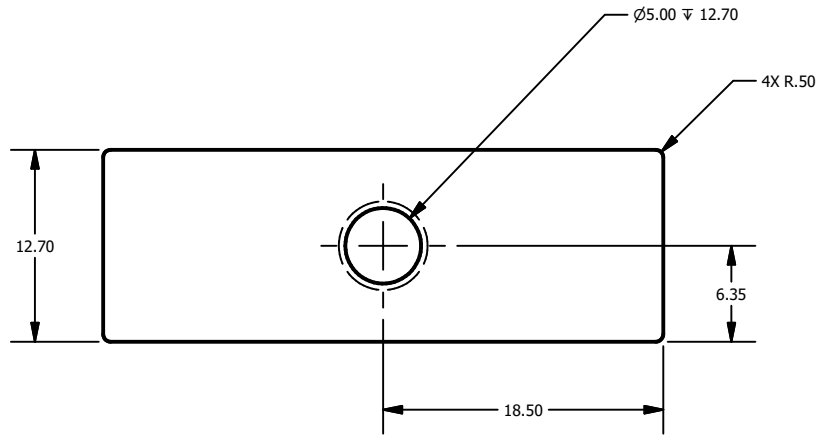
TÍTULO: YUGO		
NÚMERO DE DIBUJO: 12		
FORMATO	ESCALA: 1 : 4	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 12 DE 14	REV A

2

1

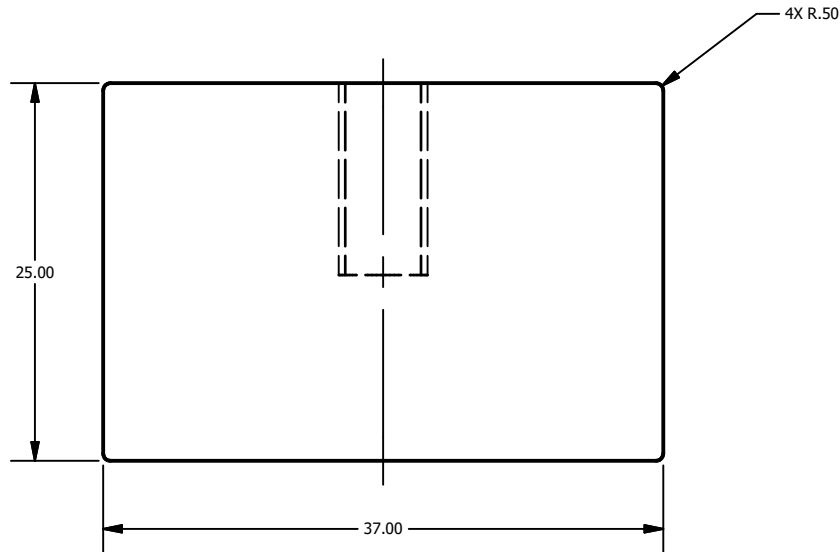
B

B



A

A



2

1

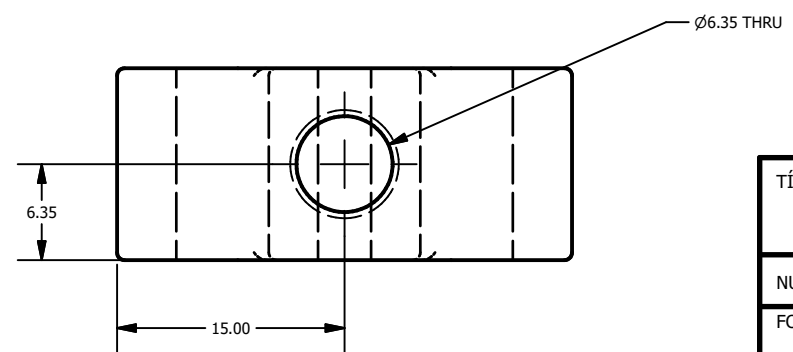
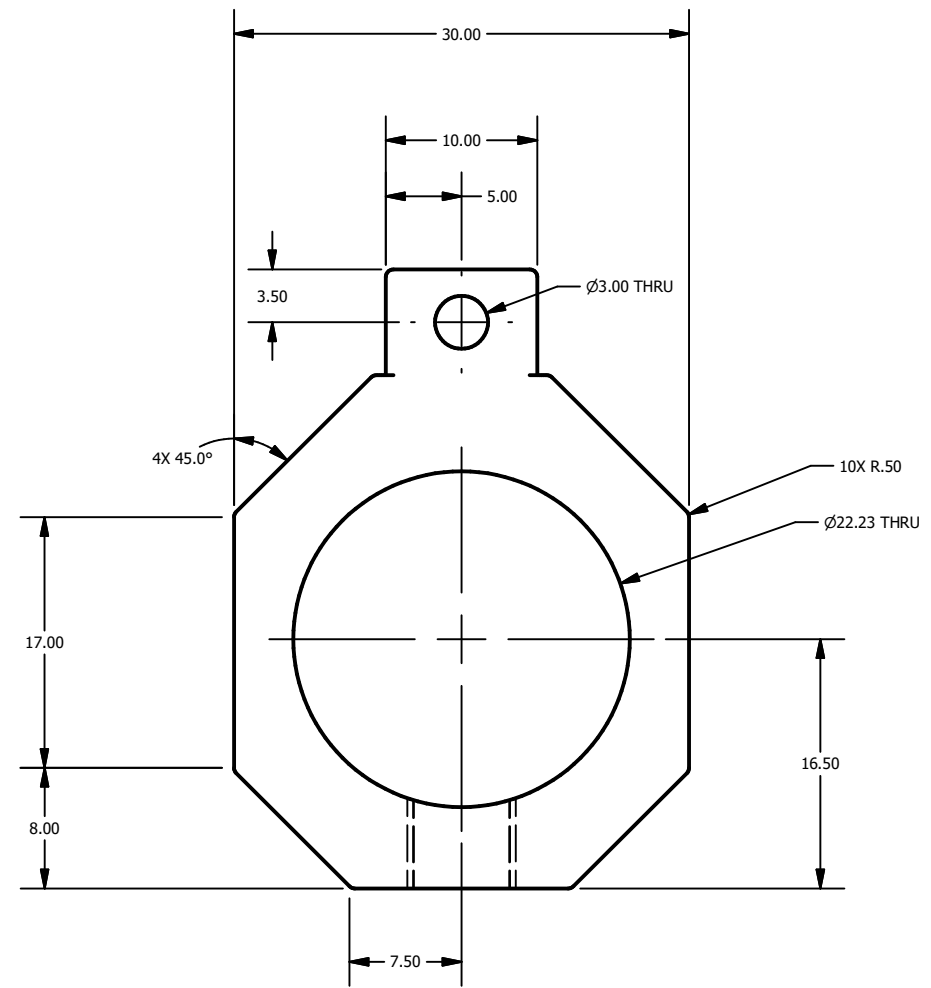
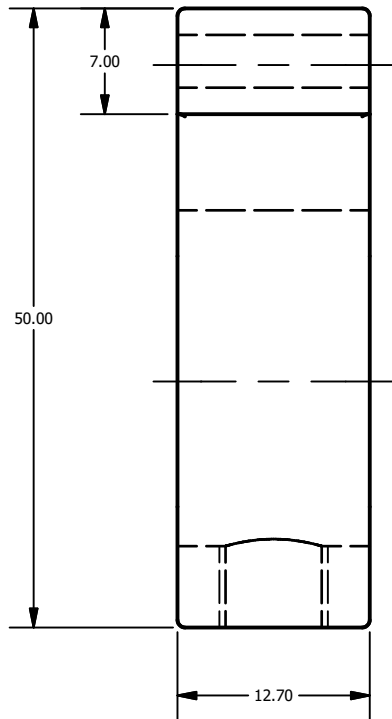
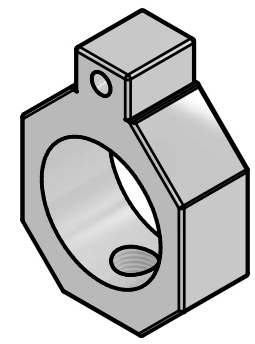
A

A

TÍTULO:		PLACA DE CONTACTO	
NÚMERO DE DIBUJO: 13			
FORMATO	ESCALA: 2 : 1	UNIDADES: MM	
A	PÁGINA 13 DE 14	REV A	

2

1



TÍTULO: CONECTOR CENTRAL		
NÚMERO DE DIBUJO: 14		
FORMATO	ESCALA: 2 : 1	UNIDADES: MM
A	PÁGINA 14 DE 14	REV A

2

1

