

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de pedales para un simulador de avión  
comercial para uso didáctico en Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Ana Lucía Pérez Pérez para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2024







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño y fabricación de pedales para un simulador de avión  
comercial para uso didáctico en Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Ana Lucía Pérez Pérez para  
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2024



Vo.Bo. Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

Vo.Bo. Tema Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Andrés Rodrigo Viau Najarro

  
\_\_\_\_\_  
MBA Gustavo Adolfo Barrera Noriega

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Rony Jose Herrarte Estevez

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



<b>Lista de figuras</b>	VIII
<b>Lista de cuadros</b>	X
<b>Resumen</b>	XI
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Antecedentes</b>	3
<b>3. Justificación</b>	5
<b>4. Objetivos</b>	7
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Marco teórico</b>	9
5.1. Simuladores de vuelo y su normativa . . . . .	9
5.1.1. Partes y componentes . . . . .	10
5.2. Ejes de avión . . . . .	11
5.3. Sistema de pedales . . . . .	12
5.3.1. Coordinación de vuelo . . . . .	13
5.4. Relación de fuerzas sobre el timón de dirección . . . . .	14
5.5. <i>Force feedback</i> . . . . .	14
5.5.1. Mecanismo de <i>Force Feedback</i> 1 . . . . .	14
5.5.2. Mecanismo de <i>Force Feedback</i> 2 . . . . .	15
5.6. Componentes del sistema de pedales . . . . .	16
5.7. Mecanismos de funcionamiento de pedales . . . . .	16
5.7.1. Mecanismo de pedales 1 . . . . .	17
5.7.2. Mecanismo de pedales 2 . . . . .	17
5.7.3. Mecanismo de pedales 3 . . . . .	18
5.7.4. Mecanismo de pedales 4 . . . . .	18
5.8. Sensores . . . . .	18

5.9. Materiales . . . . .	19
5.10. Simuladores comerciales . . . . .	19
5.11. Kits de pedales en el mercado . . . . .	20
5.12. Dispositivo de entrenamiento de vuelo sintético . . . . .	22
<b>6. Metodología</b>	<b>23</b>
6.1. Descripción de metodología . . . . .	23
6.2. Definición de requisitos . . . . .	24
6.3. Creación y selección de ideas . . . . .	26
6.3.1. Diseño y construcción . . . . .	27
6.3.2. Materiales . . . . .	27
6.3.3. Sensores . . . . .	28
6.4. Diseño preliminar . . . . .	29
6.5. Cálculos . . . . .	32
6.5.1. Determinación experimental de fuerzas . . . . .	35
6.5.2. Análisis en Ansys . . . . .	36
6.5.3. Perfil A . . . . .	39
6.5.4. Perfil B . . . . .	40
6.5.5. Tornillos . . . . .	42
6.5.6. Ejes . . . . .	44
6.5.7. Cojinetes . . . . .	45
6.5.8. Soportes . . . . .	46
6.5.9. Pedales . . . . .	47
6.6. Sistema de retroalimentación de fuerza . . . . .	50
6.6.1. Giro de la base . . . . .	50
6.6.2. Giro de los pedales . . . . .	52
<b>7. Resultados</b>	<b>57</b>
7.1. Diseño final . . . . .	57
7.2. Costos del diseño . . . . .	59
7.3. Verificación de requisitos . . . . .	60
7.4. Resultados de cálculos . . . . .	61
7.5. Resultados de pruebas . . . . .	63
<b>8. Discusión de resultados</b>	<b>65</b>
<b>9. Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>10. Recomendaciones</b>	<b>69</b>
<b>11. Bibliografía</b>	<b>71</b>
<b>12. Anexos</b>	<b>73</b>
12.1. Protocolo de pruebas . . . . .	73
12.2. Manual de fabricación y ensamble . . . . .	73
12.3. Planos de construcción . . . . .	73

1. Partes y componentes de un simulador tipo D . . . . .	11
2. Ejes coordenados del avión . . . . .	11
3. Funcionamiento del timón de dirección . . . . .	12
4. Funcionamiento del timón de dirección y frenos . . . . .	13
5. Sistema de poleas y actuador lineal . . . . .	15
6. Sistema de resortes de compresión y torsión . . . . .	15
7. Componentes del sistema de pedales en los distintos diseños . . . . .	16
8. Mecanismo de pedales 1 . . . . .	17
9. Mecanismo de pedales 2 . . . . .	17
10. Mecanismo de pedales 3 . . . . .	18
11. Pedales de timón <i>Logitech Pro</i> . . . . .	21
12. Pedales de timón <i>crosswind</i> . . . . .	21
13. Pedales de timón <i>Thrustmaster Pendular TPR</i> . . . . .	22
14. Base de pedales . . . . .	29
15. Rotación de la base al presionar el pedal derecho . . . . .	29
16. Sistema de <i>Force Feedback</i> . . . . .	30
17. Piezas de soporte del pedal . . . . .	31
18. Sistema de pedales . . . . .	31
19. Explosión del pedales . . . . .	32
20. Vista superior de la base, señalización de análisis . . . . .	33
21. Medición de fuerza ejercida por el peso del pie . . . . .	35
22. Medición de fuerza máxima ejercida para rotar el mecanismo . . . . .	35
23. Medición de fuerza máxima de frenado . . . . .	36
24. Modelo de análisis simplificado . . . . .	37
25. Modelo de análisis en Ansys . . . . .	37
26. Modelo de análisis en Ansys . . . . .	38
27. Diagrama de cuerpo libre, de corte y momento para el perfil A . . . . .	40
28. Diagrama de cuerpo libre, de corte y momento plano Y-Z . . . . .	41
29. Diagrama de corte y momento en el plano X-Z . . . . .	42
30. Diagrama de cuerpo libre de la viga A con los tornillos . . . . .	43
31. Diagrama de corte y momento correspondiente al eje del soporte 2 . . . . .	44
32. Diagrama de cuerpo libre correspondiente al soporte 2 . . . . .	46

33. DCL y diagrama de corte y momento correspondiente al pedal . . . . .	48
34. Sistema de retroalimentación de fuerza . . . . .	50
35. Ficha técnica del resorte . . . . .	51
36. DCL del mecanismo de retroalimentación de fuerza . . . . .	51
37. Geometría de la leva lineal . . . . .	52
38. Sistema de retroalimentación de fuerza del pedal . . . . .	53
39. Ficha técnica del resorte del pedal . . . . .	53
40. DCL sistema de retroalimentación de fuerza del pedal . . . . .	54
41. Cambio de ángulo . . . . .	54
42. Ensamble de pedal . . . . .	57
43. Ensamble final de la base . . . . .	58
44. Ensamble de la base y <i>Force Feedback</i> . . . . .	58
45. Diseño de soportes de la base . . . . .	58
46. Diseño final de ejes . . . . .	59

---

## Lista de cuadros

---

1. Identificación de códigos	24
2. Requisitos	25
3. Matriz de ponderación para los materiales del sistema de pedales	27
4. Matriz de ponderación para los materiales del sistema de pedales	28
5. Matriz de ponderación para los sensores del sistema de pedales	28
6. Datos de la geometría	33
7. Propiedades del aluminio 6061 y acero 1018	34
8. Fuerzas obtenidas por el dinamómetro	36
9. Resultados obtenidos para 53.4 Newtons	38
10. Resultados obtenidos para 71.5 Newtons	38
11. Resultados obtenidos para 150 Newtons	39
12. Resultados obtenidos para 196.1 Newtons	39
13. Resultados obtenidos para el perfil A	40
14. Resultados obtenidos para el perfil B	42
15. Propiedades del perno M3x20 grado 4.6	43
16. Factores de seguridad para el soporte 3	43
17. Factores de seguridad para el anclaje	44
18. Resultados obtenidos para el eje en el punto 2	45
19. Resultados obtenidos para las partes atornilladas al perfil	47
20. Resultados obtenidos para el agujero en el soporte	47
21. Propiedades de la madera	47
22. Costos del diseño final	59
23. Requisitos	60
24. Resultados obtenidos para el perfil A	61
25. Resultados obtenidos para el perfil B	61
26. Factores de seguridad para el anclaje	61
27. Factores de seguridad para el soporte 3	62
28. Factores de seguridad para el anclaje	62
29. Resultados obtenidos para el eje en el punto 2	62
30. Resultados obtenidos para las partes atornilladas al perfil	62
31. Resultados obtenidos para el agujero en el soporte	63
32. Resultados de la base	63

33. Resultados del freno en pedal derecho	64
34. Resultados del freno en pedal izquierdo	64

El proyecto “Diseño y fabricación de pedales para un simulador de avión comercial” aborda la necesidad de una solución accesible y de bajo costo para la formación de pilotos en Guatemala. Ante la carencia de simuladores económicos, el enfoque se centra en desarrollar un sistema de pedales que simule con precisión las maniobras de guiñada en situaciones como despegues y aterrizajes.

El diseño de los pedales incorpora un sistema de *force feedback* para aumentar la resistencia en condiciones de vuelo, simulando las fuerzas reales que enfrenta un piloto. Además, los materiales seleccionados, como el aluminio, el PETG y la madera, aseguran un prototipo ligero, duradero y fácil de ensamblar.

El costo total de los materiales para llevar a cabo el diseño propuesto fue de Q595.85, garantizando tanto la funcionalidad como la fiabilidad requeridas para la enseñanza de pilotos. Se realizaron cálculos de fatiga, análisis de materiales y se aplicaron procedimientos empleando tecnologías accesibles, como la impresión 3D y sensores de bajo costo.

Las pruebas realizadas con el prototipo físico validaron el diseño y la funcionalidad del sistema aplicando distintas fuerzas. Los pedales están diseñados para ofrecer una experiencia de vuelo realista mediante la incorporación de *Force Feedback*, lo que simula las fuerzas que enfrentaría un piloto. Además, los pedales incluyen frenos independientes para cada pie, lo que permite al usuario controlar también la velocidad en tierra. Se evaluaron cuatro mecanismos de pedales: el primero consiste en pedales independientes con bloqueo en el pedal opuesto; el segundo utiliza un balancín central con un apoyo en la parte inferior de ambos pedales; el tercer mecanismo incorpora dos balancines, uno en la parte superior y otro en la inferior del pedal; y el cuarto mecanismo emplea una barra torsional que convierte el movimiento de rotación en movimiento lineal para accionar el freno.

Finalmente, el análisis de los componentes estructurales del sistema de pedales mostró que tanto los perfiles A y B, como los ejes y soportes, tienen una vida útil infinita bajo las cargas aplicadas, garantizando su durabilidad a largo plazo. Además, los factores de seguridad calculados para los tornillos, las uniones pernadas en los soportes y las uniones pernadas al anclaje superan los valores de 2.1, lo que asegura que estos elementos no presentarán fallas bajo condiciones normales de uso.



Un simulador de vuelo tiene como objetivo proteger la vida de los pilotos al permitir la práctica de maniobras básicas y de alto riesgo, como situaciones de emergencia (Rico, 2018). Tras la crisis provocada por la pandemia de COVID-19, la demanda de pilotos profesionales aumentó considerablemente (Lima, 2022). Sin embargo, los costos asociados con los requisitos de formación son altos, al igual que el precio elevado de los módulos de pedales en el mercado, lo que dificulta el acceso a herramientas de aprendizaje adecuadas (LogiTech, 2023). Es fundamental contar con experiencia y conocimiento en el campo de la aviación para prevenir accidentes que puedan poner en riesgo la vida de los pasajeros (Wilshire Law Firm, 2024). Por ello, resulta crucial desarrollar un módulo de pedales de bajo costo que ofrezca el mismo nivel de aprendizaje que un equipo profesional.

Guatemala cuenta con escuelas y técnicos de aviación, sin embargo, el costo de estos cursos supera un aproximado de Q 5,000 al mes (de Escuela de Aviación, 2020), lo cual no se considera de bajo costo. Aunque también existen videojuegos en línea que ofrecen las características de un simulador de avión, sin embargo, estos juegos no se consideran un medio oficial de entrenamiento para pilotos y el precio del conjunto de implementos como pedales o timones compatibles con los juegos es elevado (Morales, 2022).

Algunas herramientas *open source* utilizadas para desarrollar simuladores de vuelo, como la realidad virtual, no incorporan el módulo de pedales, un componente esencial que sigue faltando en varios diseños. Aunque la realidad virtual ofrece una experiencia más inmersiva, se reconoce que puede ser menos precisa en comparación con simuladores más avanzados y sigue siendo una opción costosa. En cuanto al hardware, los simuladores actuales permiten probar y diseñar sistemas de control automático y lectura de señales, aplicables al desarrollo de vehículos aéreos no tripulados (UAVs). Este enfoque vislumbra un futuro donde los vuelos podrían realizarse sin la necesidad de pilotos profesionales a bordo, utilizando “pilotos automáticos”.

La solución propuesta se centra en el diseño y fabricación de un sistema de pedales para un simulador de avión comercial, con énfasis en la reducción de costos y la accesibilidad para la formación de pilotos en Guatemala. El proyecto incluye un prototipo funcional que permite

simular la guiñada de la aeronave durante maniobras clave, como despegue, aterrizaje y rodaje. El diseño emplea materiales asequibles y tecnologías simples, como la impresión 3D y sensores económicos, y está compuesto por las siguientes partes: pedal derecho e izquierdo, enlace entre ambos, mecanismo de frenos, resortes y la base de los pedales.

#### Simulador de vuelo basado en herramientas *OpenSource*

Los instrumentos principales que pueden ser utilizados para el desarrollo de un simulador son: Altímetro, indicador de velocidad aérea, indicador de revoluciones del motor, horizonte artificial, indicador de rumbo, coordinador de giro, medidor de nivel de combustible, indicador de presión de aceite, reloj de temperatura del motor, panel de radio, comunicaciones y transpondedor, panel de piloto automático, mandos de luces y control de la aviónica principal, conjunto de palancas de gases y acelerador, módulo de control de Flaps y tren de aterrizaje. Este trabajo da a conocer el procedimiento correcto o recomendado a seguir para conseguir un buen funcionamiento tanto de software como hardware que compone el simulador de avión, la principal deficiencia de este trabajo es el sistema de pedales con el cual no cuenta y se pretende mejorar (Martín, [2013](#)).

#### Realidad virtual de un simulador de avión

Otra forma de llevar a cabo el proyecto en cuestión se utilizan lentes de realidad virtual, un celular con al menos 4GB de memoria RAM, una computadora y un gamepad, según lo presentado por Valentino, 2017 tiene como ventajas que es una forma más sencilla de utilizar y comprender el ambiente que podría vivirse y por los pocos instrumentos que se utilizan es fácil de transportar, sin embargo puede observarse que es deficiente en comparación con un simulador de realidad virtual que cuenta con timón, pedales y botones o sensores que son necesarios conocer para alguna persona interesada en aprender a volar un avión real (Kelvin Valentino & Joelianto, [2017](#)).

#### Técnicos de piloto aviador en Guatemala

En Guatemala existen varias escuelas y técnicos de aviación, en caso las personas se muestren interesados por aprender a pilotar un avión es necesario realizar los distintos cursos teóricos para luego tener acceso a un simulador de avión, sin embargo, el costo de estos cursos supera un aproximado de Q 5,000, dichas academias no proporcionan más información acerca de la efectividad tanto de los cursos como del simulador de avión. La

escuela de avión S. A. es una de las escuelas más completas, ofrecen la práctica en un simulador de avionetas únicamente, sin costo, mas no cuentan con un simulador de avión comercial el cual pueda usarse por hora, es necesario realizar los pagos de los cursos teóricos anteriormente mencionados primero (de Escuela de Aviación, [2020](#)), (Aviador, [2023](#)).

### Ingeniería mecánica aeronáutica

La ingeniería mecánica aeronáutica como su nombre lo indica se enfoca en el análisis y diseño de vehículos aéreos, como ejemplo puede observarse la tesis de la carrera de Ingeniería en Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, el proyecto consiste en analizar con un modelo matemático un vehículo con despegue y aterrizaje vertical, posteriormente diseñarlo físicamente e implementarle un sistema de control (Cheno, [2015](#)).

### Simuladores de avión a lo largo del tiempo

En 1909 el ingeniero y aviador de Orville Wright inventó el primer simulador de vuelo, pues notó que los vuelos reales eran muy peligrosos y una caída podría ser catastrófica para los pilotos primerizos. De dicha fecha hasta lo más reciente es muy importante resaltar los componentes para el movimiento y control de las plataformas ya que lo más importante es brindar las experiencias en un ambiente seguro y controlado (AVIATIONGROUP, [2020](#)), (Chaparro, [2019](#)).

### Hardware de la simulación de vuelo

Otros puntos de vista para la aplicación de simulaciones de vuelo, es que también hay aplicaciones científicas: “mediante el simulador se pueden diseñar y testear en tiempo real sistemas de control automático. Los sistemas de control automático y la lectura de señales de los Sistemas de Navegación Inercial forman la piedra angular para el desarrollo de Vehículos Aéreos No-Tripulados (UAVs). Por lo tanto, en el futuro, el simulador será utilizado como plataforma de desarrollo virtual de UAVs.” (Limache, [2010](#)).

### Simulador de avión económico vs simulador de avión costoso

Existen videojuegos en línea que ofrecen las características de un simulador de avión, tanto aviones comerciales como aviones de batalla, para ello es posible adquirir la tarjeta de juego que corresponde a la interfaz, el volante, los botones y pedales físicos que complementan la experiencia “real” de un vuelo, sin embargo, estos no se utilizan para entrenar a un piloto aviador y el precio del conjunto de implementos es elevado. Por otro lado, es posible adquirir un simulador profesional aprobado por la Administración Federal de Aviación (FAA) llamado Elite PI-135, el cual es más costoso, pero sí prepara de mejor manera a los aspirantes a pilotar un avión (Morales, [2022](#)), (Training, [2023](#)).

Los vuelos comerciales requieren de dos pilotos por cada cabina lo cual facilita la prevención de situaciones de emergencia, permitiendo que cada piloto tome recesos evitando la fatiga, además de ayuda mutua para el enfrentamiento a situaciones de emergencia (Hughes, 2022). Aunque, la frecuencia con la que ocurren los accidentes aéreos es poco común, la mayoría de estos son catastróficos y cobran la vida de los pasajeros. Los abogados de accidentes de aviación de Wilshire Law Firm, comprenden que a menudo los accidentes de aviación ocurren debido al error humano (Wilshire Law Firm, 2024). Con el objetivo de disminuir los riesgos de accidentes aéreos y ampliar el campo y la accesibilidad a la industria aeronáutica en Guatemala es necesario desarrollar simuladores de vuelo que permitan realizar pruebas y procedimientos de situaciones de vuelo cotidiana y también de riesgo, que sean económicos para el aprendizaje de ingenieros, pilotos o personas que aspiren a una licenciatura en aviación en Guatemala.

Luego de la crisis causada por la pandemia COVID – 19, las principales aerolíneas se interesaron en contratar un aproximado de 13,000 comandantes de vuelo en 2023 y 8,000 más en 2024 (Lima, 2022). La formación de un piloto privado de avión comercial consta de 300 horas lectivas y 40 horas de vuelo, de las cuales 20 horas se llevan a cabo en un simulador de vuelo (Rodriguez, 2019). El costo de alquiler por hora de un simulador de vuelo es de Q1,000 (Aerotraining), partiendo de esta situación surge la necesidad de un simulador de vuelo el cual debe ser lo más realista posible para que los pilotos puedan aprender y entrenar de forma segura, accesible y efectiva. Por lo tanto, en esta investigación se llevará a cabo el diseño y la fabricación de pedales mediante el uso de resortes y materiales de bajo costo para un simulador de avión comercial para el aprendizaje, siendo este accesible monetariamente para los usuarios. Considerando que el sistema de pedales de tipo recreativo tiene un valor aproximado de Q1, 300 (LogiTech, 2023) se busca una alternativa de menor costo que no supere los Q500 partiendo de una correcta y económica selección de materiales y componentes.



### 4.1. Objetivo general

Diseñar y fabricar el sistema de pedales para un simulador de cabina de avión comercial para el aprendizaje o entretenimiento de futuros pilotos guatemaltecos, con una inversión máxima de Q 500.

### 4.2. Objetivos específicos

1. Establecer las normas y requisitos para el diseño del sistema de pedales de avión comercial.
2. Seleccionar el nivel de inclinación, resistencia, número de ciclos y materiales del prototipo.
3. Seleccionar los sensores que recopilen la información de posición, velocidad y aceleración del sistema de pedales.
4. Fabricar un prototipo de un sistema de pedales compatible con el resto de los módulos que conforman un simulador de avión comercial.
5. Crear el manual de fabricación y ensamble del sistema de pedales para un simulador de avión comercial.



## 5.1. Simuladores de vuelo y su normativa

Un simulador de vuelo es un sistema de realidad virtual que permite replicar la experiencia de pilotar una aeronave de forma realista y precisa con el objetivo de salvaguardar la seguridad del operador. Estos son comúnmente utilizados para el entrenamiento de pilotos en la industria de la aviación, entrenamiento de pilotos militares, simulación de desastres (turbulencias, vientos, tormentas, nubosidades entre otros) o fallas durante el vuelo, desde el despegue hasta el aterrizaje y el desarrollo de aeronaves (Rico, 2018). Según la normativa de la *Federal Aviation Administration* (FAA), los simuladores de vuelo son categorizados de tres formas tras una serie de requisitos: simuladores de vuelo (FS), dispositivos de entrenamiento de vuelo sintético (FTD o FSTD) y dispositivos de formación de la aviación (ATD). Los simuladores de vuelo poseen una clasificación que va desde la A a la D, siendo la categoría D la más alta (FAA, 2021). Según la clasificación, el nivel A son sistemas de movimiento con al menos 3 grados de libertad. El nivel B requiere de 3 ejes de movimiento y un modelo aerodinámico. El nivel C requiere de una plataforma de movimiento con seis grados de libertad retardo de transporte inferior (latencia) por encima de los niveles A y B, el sistema visual debe tener un campo horizontal fuera de la vista de al menos 75 grados para cada piloto. Y el nivel D: requiere de una plataforma con seis grados de libertad, el sistema visual debe tener un campo horizontal de al menos 150 grados, sonidos realistas dentro de la cabina y efectos visuales (FAA, 2021) (Rico, 2018) (Rouse, 2015).

- Simuladores de vuelo completo (FFS): Es la categoría más alta en simuladores de vuelo ya que incluyen movimiento y capacidad visual. Estos aseguran todas las características de vuelo y el pilotaje de una marca específica de aeronave (Rico, 2018).
- Dispositivos de entrenamiento de vuelo sintético (FTD): Son dispositivos diseñados para una marca de aeronave específica, puede contar una cabina cerrada y visualización. Estos sistemas no siempre tienen ejes o grados de libertad de movimiento, pero cumplen con los requisitos para capacitaciones y certificaciones (FAA, 2021). Pueden

encontrarse comúnmente en centros de enseñanza, universidades, entre otros (Rico, 2018).

- Dispositivos de formación de la aviación (ATD): Son dispositivos que replican la instrumentación de aeronaves como los equipos, paneles y controles, se ubica en un área cubierta de vuelo o una cabina cerrada de vuelo, esta incluye el hardware y software para la representación de la aeronave (FAA, 2021).

### 5.1.1. Partes y componentes

Los simuladores de vuelo varían de un modelo a otro, sin embargo, varios de ellos tienen una configuración básica similar. El simulador se encarga de brindar al usuario una retroalimentación háptica, es decir, aquella información que el usuario puede sentir. Los dispositivos involucrados con retroalimentación de fuerza son dispositivos hápticos (Srtickland, 2023).

El diseño del simulador de vuelo debe ser idéntico al de la marca de avión real en la que se desea aprender, de modo que el piloto pueda ver los mismos controles y organización cuando mire a su alrededor. No hay un simulador ideal que pueda representar con precisión cada avión porque los diseños de cabina de los aviones varían. Algunos centros de capacitación invierten en múltiples simuladores, mientras que otros sacrifican la precisión al ceñirse a un modelo de simulador por conveniencia y costo (Srtickland, 2023). A continuación, se mencionan los componentes básicos que posee un simulador de avión, este conjunto se observa en la figura 1:

- Yugo: Se encarga de controlar el movimiento de los alerones y elevadores de la aeronave. Los movimientos que permite realizar este componente son comúnmente conocidos como cabeceo y alabeo (Sobral, 2023), como se observan en la Figura 2. Durante la simulación este se mueve hacia adelante o atrás para accionar los elevadores, es decir el cabeceo, y permite la rotación en ambas direcciones para accionar los alerones, es decir el alabeo (Sobral, 2023).
- Panel de instrumentos: Brinda retroalimentación de la información como velocidad, altitud, dirección y estado del motor del panel de instrumentos del avión. Los instrumentos básicos del panel incluyen un velocímetro, un altímetro, un indicador de giro, un horizonte artificial, un indicador de dirección magnética, un indicador de velocidad vertical, un indicador de combustible, un indicador de temperatura del motor y un indicador de presión de aceite. Otros instrumentos opcionales pueden incluir un GPS, una radio, un transponder, un compensador automático de altitud y un compensador automático de rumbo (Cameron, 2016).
- Palancas: Las palancas de aceleración varían principalmente según el tipo de motor. El tipo de motor determina si hay palancas de gases para impulsar el motor o palancas de paso para pasar aire al motor para realizar la mezcla (OACI, 2020).
- Pedales: Estos controlan la guiñada del avión, se utilizan para el control en tierra durante el rodaje, el despegue y el aterrizaje. Cada pedal tiene un freno independiente y los pedales del timón del simulador de vuelo también incluyen frenos de puntera independientes (Zachari, 2021).

Figura 1: Partes y componentes de un simulador tipo D



Fuente: Simulator Center (2023).

## 5.2. Ejes de avión

Los ejes de giro de un avión se dividen en tres rectas imaginarias trazadas sobre el avión: eje longitudinal que va desde la nariz hasta la cola del avión, se le denomina alabeo o en inglés *roll*. El eje transversal o lateral que va desde el extremo de un ala al extremo de la otra, se le denomina cabeceo o en inglés *pitch*. El eje vertical, el cual es de mayor interés para este trabajo, atraviesa el centro de avión, mueve la nariz del avión a lado izquierdo o derecho y se le denomina guiñada o en inglés *yaw*. En un sistema de coordenadas cartesianas el eje vertical o de guiñada sería el eje z (Sobral, 2023), los ejes y movimientos se muestran en la Figura 2.

Figura 2: Ejes coordenados del avión

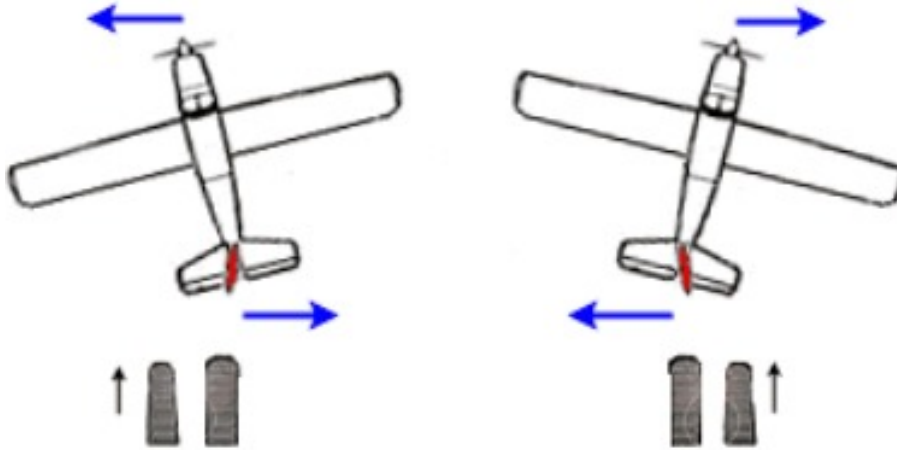


Fuente: Sobral (2023). *Introducción al estudio de áreas genéricas de la aviación*

### 5.3. Sistema de pedales

El timón de dirección o *rudder* es la superficie móvil montada en la parte posterior del empenaje vertical de la cola del avión. Su movimiento provoca el movimiento de guiñada del avión sobre su eje vertical, dicha superficie se maneja mediante el sistema de pedales que se encuentra situado en el suelo de la cabina (Sobral, 2023).

Figura 3: Funcionamiento del timón de dirección

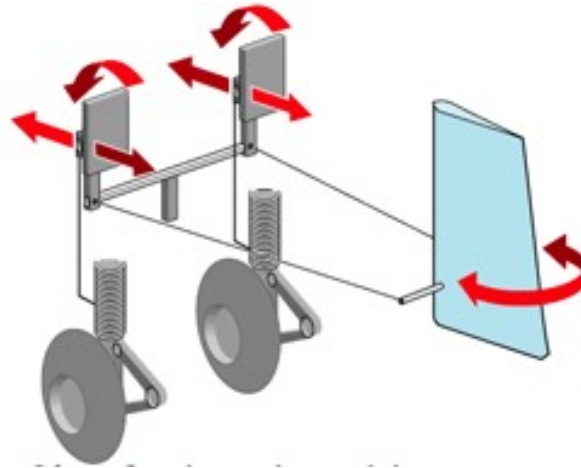


Fuente: Sobral (2023). *Introducción al estudio de áreas genéricas de la aviación*

Al pisar el pedal derecho, el timón de dirección gira hacia la derecha, provocando una reacción aerodinámica en la cola que hace que esta gire a la izquierda, y por ende la nariz del avión gire (guiñada) hacia la derecha. Al pisar el pedal izquierdo ocurre el caso contrario, el timón girará a la izquierda, la cola hacia la derecha y la nariz hacia la izquierda (Sobral, 2023). El funcionamiento del timón de dirección se observan en la Figura 3.

Los pedales se utilizan en diferentes fases del vuelo, como el rodaje, el despegue, el vuelo y el aterrizaje. Los pedales ayudan al piloto a dirigir y alinear la aeronave con la pista, a contrarrestar los vientos cruzados o los fallos del motor, y a realizar virajes y/o maniobras. Los pedales también interactúan con otros controles de vuelo, como el mando lateral, el acelerador o el sistema de compensación (Johnston, 2018). Para accionar los frenos se hace presión únicamente en la parte superior de ambos pedales, y al presionar la parte inferior de los mismos se moverá el timón de dirección, mas no se activarán los frenos (Lavilla, 2020). El funcionamiento de los frenos en los pedales se puede observar en la Figura 4.

Figura 4: Funcionamiento del timón de dirección y frenos



Fuente: Sobral (2023). *Introducción al estudio de áreas genéricas de la aviación*

Los pedales se utilizan en una variedad de maniobras básicas, incluyendo giros, aterrizajes y despegues como se menciona anteriormente. Pero también se utilizan en condiciones especiales o de riesgo, como vuelos en turbulencia, vuelos con viento cruzado y vuelos en condiciones de hielo (FAA, 2021).

### 5.3.1. Coordinación de vuelo

La dirección de movimiento del avión no siempre será la misma a la cual apunta el eje longitudinal, es decir, la nariz o morro del avión. Este cuenta con diferentes controles y acciones para mantener la dirección de vuelo (volante de control). Si la trayectoria y la nariz del avión no coinciden, entonces el vuelo no es coordinado sino se está resbalando o derrapando, mientras que, en un giro será coordinado cuando la nariz del avión apunta en la misma dirección de giro. Algunas maniobras se dan en los siguientes casos (Aviation, 2016):

- Si en vuelo recto y nivelado una ráfaga de viento lateral provoca el deslizamiento del avión respecto a su dirección de vuelo, el estabilizador de cola hará su trabajo retornando al avión a una situación de cero ángulo de deslizamiento. Sin embargo, no se puede garantizar que un avión tenga una buena estabilidad direccional; es posible que una ráfaga sea de mayor intensidad que el piloto tenga que intervenir para corregir la situación, lo cual es responsabilidad del timón de dirección (Aviation, 2016).
- Existen diversas causas que provocan la rotación del avión sobre su eje vertical a una dirección no deseada, a esto se le conoce como guiñada adversa, dicha acción es contrarrestada por el timón de dirección (Aviation, 2016).
- Para mantener un vuelo coordinado, es necesario manejar activamente los pedales a bajas velocidades (Aviation, 2016).
- En situaciones de alta velocidad y poca potencia (como en planeo), los vientos hacen que el avión guiña de manera inesperada y se requiere del uso de los pedales para

corregir este efecto. En cambio, en situaciones de baja velocidad y alta potencia (como durante el despegue o el vuelo lento), la compensación es insuficiente, por lo que será necesario actuar sobre los pedales según sea necesario para compensar el déficit (Aviation, 2016).

## 5.4. Relación de fuerzas sobre el timón de dirección

Las cuatro fuerzas básicas que actúan sobre una aeronave en vuelo son: sustentación, peso, tracción y resistencia. La sustentación es la diferencia de presión entre la parte superior e inferior del ala (llamados extradós e intradós). La sustentación es el decremento de la presión sobre la curva superior del ala, esta también depende de otros factores como: ángulo de ataque, área y forma del ala, velocidad del aire y densidad del aire, siendo estas últimas dos las más importantes para esta investigación (ANAC, 2023). El piloto es capaz de controlar el ángulo de ataque y la velocidad, el aumento de cualquiera de estas dos variables ocasionará un aumento en la sustentación. Durante el vuelo el avión experimenta la tracción, esta es la fuerza hacia adelante, producida por la hélice la cual gira a alta velocidad y desplaza la mayor cantidad de masa de aire hacia atrás, es decir, actúa como un cuerpo aerodinámico. La resistencia es la fuerza que actúa hacia atrás ocasionando resistencia hacia delante del avión que va a través del aire (ANAC, 2023).

Cuando un avión entra en ascenso es necesario aumentar la sustentación para superar el peso o la gravedad, esto es posible al aumentar el ángulo de ataque del ala. Sin embargo, al aumentar el ángulo de ataque del ala también aumenta la resistencia inducida, dicha resistencia se puede compensar aumentando la potencia del motor (FAA, 2021).

La fuerza requerida para mover el timón de dirección varía según el peso del avión, la velocidad y las condiciones del viento. La rigidez de los pedales aumenta a velocidades altas o en condiciones de viento cruzado, por lo tanto, el piloto aplicará mayor fuerza a los pedales con el objetivo de mantener el avión en una trayectoria recta. Se estima que la fuerza necesaria para mover los pedales de una aeronave Cessna está en un rango de 10 a 25 libras (Roy, 2022) , (FAA, 2021).

## 5.5. *Force feedback*

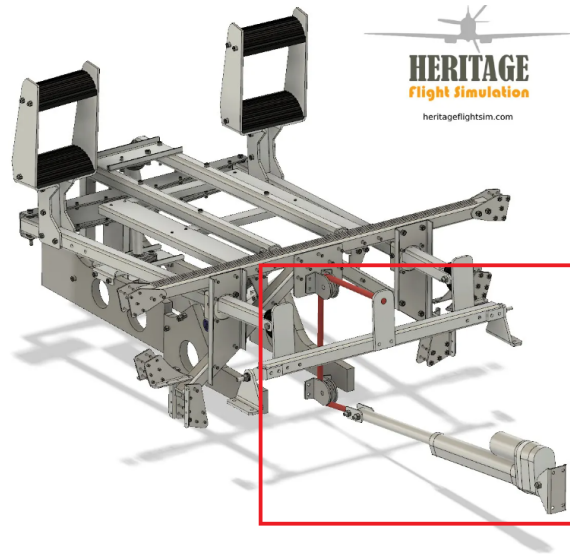
Con el objetivo de lograr una sensación real para el usuario, se implementará el concepto de *force feedback*, el cual se destaca por incrementar la rigidez de los pedales durante el vuelo en el simulador por las razones anteriormente descritas.

### 5.5.1. Mecanismo de *Force Feedback* 1

Utilizando un sistema de poleas con cuerdas elásticas para proporcionar una sensación de inercia realista, este se conforma por un actuador lineal eléctrico de 12 V el cual aplica una fuerza que es proporcional a la velocidad del avión y proporciona una retroalimentación de fuerza precisa, el actuador está controlado por DCS-BIOS, que utiliza la lectura de velocidad

del avión para determinar la cantidad de fuerza que debe aplicarse (*Pedal Force Measurement Sensor (PFMS)*, 2023), los componentes del mecanismo se observan en la Figura 5.

Figura 5: Sistema de poleas y actuador lineal

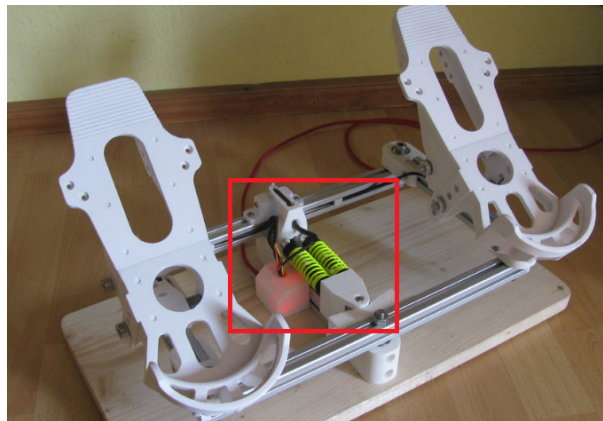


Fuente: Fenton (2018). *Rudders – a new take on Force-Feedback*

### 5.5.2. Mecanismo de *Force Feedback* 2

El segundo mecanismo requiere de uno o dos resortes de compresión, según el valor de la constante de rigidez  $k$  que se comprime con el movimiento de un seguidor y una leva al pisar cualquiera de los dos pedales. Además, al dejar de presionar los pedales, permiten que regresen a su lugar de equilibrio. En cuanto a los frenos, cada pedal tiene resortes de torsión que los mantienen a 45 grados y brindan la retroalimentación de fuerza necesaria (Scheibe, 2019), los componentes mencionados se observan en la Figura 6.

Figura 6: Sistema de resortes de compresión y torsión



Fuente Scheibe (2019). *Flight Sim Rudder Pedals*

## 5.6. Componentes del sistema de pedales

Los componentes de los pedales estarán determinados por el diseño, pero es esencial que estos cumplan con:

- Pedal izquierdo y pedal derecho: como su nombre lo indica, estos se encargan de girar el timón de dirección al lado que se este presionando. El ángulo indicado al que deben estar ambos es de  $45^\circ$  (Abuized & Essameldin, 2022).
- Enlace entre ambos pedales: cuando el pedal derecho es presionado el izquierdo debe sobresalir y vice – versa, el enlace entre ambos pedales será el encargado para cumplir con esta función (Abuized & Essameldin, 2022).
- Mecanismos de frenos y resortes: los frenos del avión se ubican en el extremo superior de los pedales, estos detienen o reducen la velocidad del avión y estos dentro de la simulación estarán representados por un resorte ubicado por detrás del pedal y permitirán disminuir el ángulo del pedal para accionarlos (Sakurai, 1991).
- Placa deslizante: esta limitará el rango de movimiento lineal de ambos pedales (Abuized & Essameldin, 2022).
- Base de pedales: los componentes de pedales estarán montados sobre una base.
- Sistema hidráulico, mecánico o eléctrico: es necesario que exista una conexión entre los pedales y el timón de dirección, dicha conexión puede ser hidráulica o mecánica principalmente, la conexión mecánica utiliza cables o varillas para transmitir la fuerza ejercida por el piloto a los pedales. La conexión hidráulica utiliza un fluido para transmitir la fuerza (Strand & Simon, 2019).
- Ajuste de pedal: Los pedales deben poder ajustarse para la comodidad del operario.

El diseño de estos varía según su fabricante, sin embargo, estos cumplen con las características anteriormente descritas. Estos se pueden observar en la Figura 7.

Figura 7: Componentes del sistema de pedales en los distintos diseños



Fuente: AZ (2021). *Best Rudder Pedals*

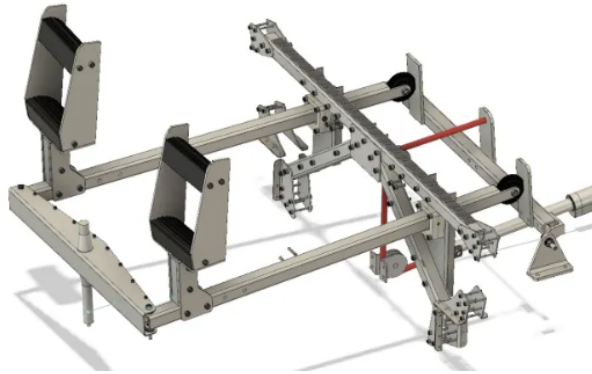
## 5.7. Mecanismos de funcionamiento de pedales

Existen distintos diseños e ideas para llevar a cabo el sistema de pedales de timón para un avión, estos varían según la complejidad de la geometría, las tecnologías que utilizan y el precio total de construcción, a continuación se presentan las distintas opciones:

### 5.7.1. Mecanismo de pedales 1

El mecanismo cuenta con dos pedales independientes, sin embargo, estos contarán con un mecanismo que bloquee el pedal opuesto al que se está presionando, de tal forma que no sea posible presionar ambos, ya que en la práctica esta acción no es posible. Además, cada pedal tendrá instalado un sensor de posición que como su nombre lo indica, se encargará de comunicar a la interfaz si el avión está cambiando de dirección tanto en magnitud como en dirección (Fenton, 2018).

Figura 8: Mecanismo de pedales 1

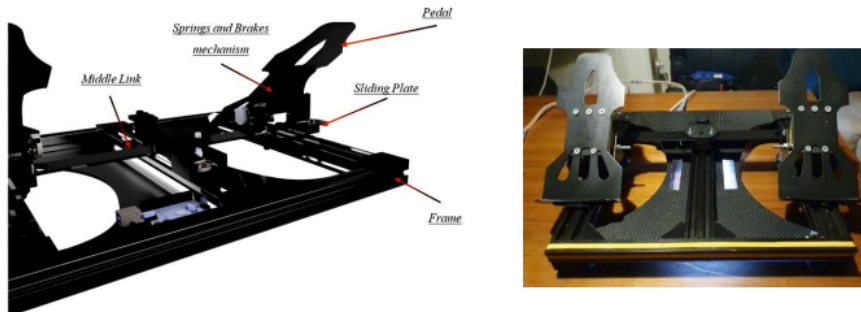


Fuente: Fenton (2018). *Rudders – a new take on Force-Feedback*

### 5.7.2. Mecanismo de pedales 2

El mecanismo de pedales 2 es implementando un balancín, es decir que al presionar un pedal, el otro sobresaldrá automáticamente, ya que estos estarán uno a cada extremo de una barra de aproximadamente 35 cm de longitud y estará apoyado por el medio, los extremos de la barra estarán apoyados en la parte inferior de los pedales (Abuized & Essameldin, 2022).

Figura 9: Mecanismo de pedales 2

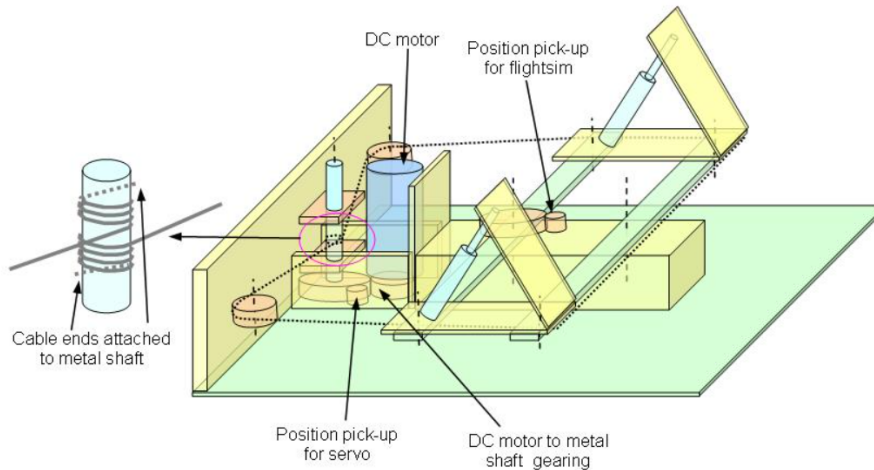


Fuente: Abuized (2022). *Motion Cueing Algorithm for Flight Simulator: Interfacing and Pilot Controls Implementation*

### 5.7.3. Mecanismo de pedales 3

El mecanismo de pedales 3 está compuesto por un diseño que es similar al anterior, sin embargo, el elemento que cumple con la función de balancín no será uno sino dos, los cuales están apoyados por la parte superior e inferior del pedal, ya que en la parte superior se añadirá una barra con un cambio de diámetro que simulará la presión que es necesario ejercer para simular el freno (Roy, 2022).

Figura 10: Mecanismo de pedales 3



Fuente: Roy (2022). *World Biggest International Flight Simulation*

### 5.7.4. Mecanismo de pedales 4

Por último, se tomará en cuenta un diseño basado en una barra torsional para el dispositivo de freno de los pedales, el cual se basa en el principio de que una barra de torsión puede utilizarse para convertir el movimiento de rotación en movimiento lineal. En este caso, la barra de torsión se coloca entre los pedales de dirección y el sistema de frenos (Ming, 2023).

Cuando el piloto presiona un pedal, la barra de torsión gira. Este movimiento de rotación se convierte en movimiento lineal, que se utiliza para aplicar los frenos al timón de dirección. Este sistema se caracteriza principalmente por ser compacto y ligero, lo que lo hace ideal para su uso en aviones. También es fiable y tiene un bajo coste de mantenimiento (Ming, 2023).

## 5.8. Sensores

Los sensores serán instalados en los pedales, de esta forma será posible documentar y recopilar la información de las acciones que está realizando el operario y la fuerza o rigidez que irá aumentando conforme sean simuladas las condiciones en las que estará el avión.

- Sensores potenciométricos: miden el ángulo de rotación de los pedales del timón de

dirección. Son el tipo de sensor más común utilizado en los pedales (Strand & Simon, 2019).

- Sensores de efecto Hall: miden el cambio en el campo magnético generado por un imán permanente. Son una alternativa a los sensores potenciométricos, ya que son más fiables y tienen una vida útil más larga (Fenton, 2018).
- Sensores de ángulo de inclinación: miden el ángulo de inclinación de los pedales del timón de dirección. Son menos comunes que los sensores potenciométricos o de efecto Hall, pero pueden ser más precisos en entornos con vibraciones (Abuized & Essameldin, 2022).
- Sensores de fuerza: miden la cantidad de presión que el piloto aplica a los pedales. Esta información puede ser utilizada por el sistema de control de vuelo para ayudar a mantener el avión estable en vuelo (*Pedal Force Measurement Sensor (PFMS)*, 2023).
- Actuador lineal eléctrico de 12 voltios controlado por un DCS – BIOS (Fenton, 2018).

## 5.9. Materiales

En general los materiales a utilizar deben ser capaces de soportar la fuerza que aplicará el operario a los mismos, por lo que estos pueden llevarse a cabo utilizando madera (Roy, 2022), metal, aluminio o acero sólido los cuales aseguran una mayor duración (*Flight sim rudder pedals – ruddo+*, 2023).

Ya que se pretende llevar a cabo un modelo ligero, barato y fácil de moldear dos opciones viables de polímeros por usar son: el poliacido láctico (PLA) o tereftalato de polietileno (PET) para fabricar las carcasas, las cubiertas y los protectores de los pedales de timón (A., 2023). El caucho es flexible resistente al deslizamiento y a la abrasión, por lo tanto, es útil para fabricar las almohadillas, los topes y los amortiguadores de los pedales de timón (A., 2023).

## 5.10. Simuladores comerciales

Los simuladores de vuelo de avión se pueden utilizar tanto para la aprendizaje de futuros pilotos en academias, simuladores de pago para PC o para consolas de video, y juegos de simulación gratuitos (Autari, 2021). A continuación se mencionan algunos simuladores de vuelo profesionales:

- Simuladores FNPT: Los simuladores de vuelo FNTP están destinados a ser utilizados en cualquier etapa del aprendizaje del piloto, desde las etapas iniciales hasta los cursos de actualización. Es un dispositivo con una base fija. Se utiliza para practicar procedimientos básicos en cabinas de vuelo, actuaciones ante situaciones de emergencia, habilidades de navegación aérea o comunicación en cabina. El simulador tiene la certificación MCC (*Master Certified Coach*), también puede usarse para vuelos coordinados entre piloto y copiloto. El piloto solo habrá aprendido a volar en la parte

izquierda de la cabina antes de obtener la certificación, pero también puede actuar como subcomandante de cabina, realizando tareas de coordinación y apoyo (Autari, 2021).

- Simuladores FFS: No ofrecen la posibilidad de coordinación entre el piloto y copiloto, además simulan un tipo específico de avión. Se emplea mayormente en las últimas fases de formación del piloto y este debe practicar procedimientos específicos. Estos incorporan una base que puede moverse para reflejar el movimiento y las vibraciones de la aeronave y suelen tener mayor complejidad técnica con el objetivo de crear un vuelo todavía más realista (Autari, 2021).
- SOLO Airliner Flight Panel: Se trata de un panel de control monoplaza destinado a simular la aviación comercial y general, tanto de aviones monomotor como bimotor. Está especialmente diseñado para que el alumno pueda seguir su entrenamiento desde casa. Cuenta con una pantalla táctil donde los estudiantes pueden seleccionar el panel de control que quieran. Es capaz de recrear con gran precisión los paneles de varios aviones, incluidos los Cessna C-172 y C-182 RG, Mooney Bravo M20J, Beechcraft Baron B58 y Boeing 737. Además, dispone de controles genéricos para aeronaves turbohélices, monomotores y bimotores (Autari, 2021).
- Airbus A320 FTD COMPLIANT: Este simulador cuenta con un software de entrenamiento específico con licencia profesional que puede ser actualizado con las novedades de la propia empresa Airbus. Por su alto nivel de realismo, es uno de los simuladores de vuelo aprobados por EASA FTD. Este simulador tiene un sistema de escenarios hiperrealistas, una visualización cilíndrica de 220°, control para piloto y comandante, una base de datos global y un control electrónico CANBUS. Además, permite la configuración de la meteorología y la representación de todas las aproximaciones actuales (Autari, 2021).

## 5.11. Kits de pedales en el mercado

Juegos como *Elite Dangerous*, *X - Plane 11* o *MSFS 2020* permiten asignar el control de guiñada al movimiento giratorio de la palanca de vuelo. Sin embargo para un entrenamiento profesional de piloto los pedales aportan mayor realismo en general. Las marcas ofrecen kits de sistemas de pedales tanto de bajo costo, rango medio y de alta gama.

- *Rudder pedals Logitech Pro*: Son una opción barata y popular, con un peso de 5 libras aproximadamente, lo cual no permite que se deslicen en el suelo al pisarlos y ejercer fuerza, poseen almohadillas anti deslizantes aunque también es posible atornillarlos a la cabina de ser necesario. Los pedales en específico poseen tres ajustes distintos según el tamaño del pie de la persona, recopila información utilizando potenciómetros (Zachari, 2021). La tensión o *Force feedback* se puede ajustar con la perilla central que posee, no es de la misma intensidad que un Cessna real pero es mayor a la tensión que otros kits de pedales más económicos como por ejemplo los pedales de timón CH Pro (Zachari, 2021). La mayoría de sus piezas son de plástico por lo que comúnmente luego de su uso prolongado estas se rompen, por lo que un sistema de pedales de metal podría brindar mayor durabilidad (Zachari, 2021).

Figura 11: Pedales de timón *Logitech Pro*



Fuente: AZ (2021). *Flight Sim Rudder Pedals Explained*

- MFG viento cruzado: Es un sistema de pedales de rango medio, el aumento de precio es proporcional a sus características tanto físicas como tecnológicas. Sus piezas y componentes son de metal lo cual los hace más duraderos y la recopilación de datos es mediante sensores magnéticos *Hall* (Zachari, 2021).

Figura 12: Pedales de timón *crosswind*



Fuente: AZ (2021). *Flight Sim Rudder Pedals Explained*

- Pedales *Thrustmaster* TPR: Son pedales de alta gama, su precio es bastante elevado, sin embargo, estos contribuyen al realismo y la experiencia que se busca. Sus piezas y componentes son de metal, utiliza un mecanismo pendular el cual proporciona un movimiento más suave en los pedales y posee resortes ajustables para ajustar la resistencia, utiliza sensores de efecto Hall y tiene una resolución de 16 bits en los tres ejes, es decir que con cualquier mínimo movimiento, este lo detectará, el ángulo de freno se puede ajustar en un rango de 35 a 75° (Zachari, 2021).

Figura 13: Pedales de timón *Thrustmaster Pendular TPR*



Fuente: AZ (2021). *Flight Sim Rudder Pedals Explained*

## 5.12. Dispositivo de entrenamiento de vuelo sintético

El propósito del dispositivo de entrenamiento de vuelo sintético (no posee movimiento) es enseñar a futuros pilotos, por lo que debe cumplir con las características y generalidades requeridas por la Dirección General de Aeronáutica Civil G.D.A.C. las cuales son (DGAC, 2023):

1. Ser una copia de instrumentos, equipo de panel y controles de una o más aeronaves en una cubierta de vuelo abierta o cerrada, incluyendo equipo mecánico, electrónico y programas para los sistemas instalados, para simular las operaciones de la aeronave tanto en tierra como en vuelo.
2. No necesita tener sistema de movimiento o visual.
3. Contar con un certificado de aprobación extendido por la Autoridad Aeronáutica del Estado del fabricante.
4. Haber sido evaluado, calificado y aceptado por la D.G.A.C.

## 6.1. Descripción de metodología

El proceso de diseño e implementación del sistema de pedales para un simulador de vuelo didáctico consistió en las siguientes etapas: creación y selección de ideas, diseño de componentes y piezas a implementar, cálculos, fase de pruebas y ajustes en el diseño. Para lograrlo, fue necesario comprender las opciones disponibles en el mercado y ajustar las ideas para lograr una opción más económica sin sacrificar la eficacia en el aprendizaje de futuros pilotos de aviación.

- Creación y selección de ideas: Debido a que existen distintas formas de llevar a cabo el sistema de pedales, fue necesario implementar matrices de ponderación en las cuales se colocan los criterios más importantes a considerar durante el proceso de fabricación. Se evalúan criterios predefinidos, asignando un puntaje de 1 a 5 (siendo 1 el peor y 5 el mejor). Luego, se multiplica cada puntaje por el peso del criterio y se suman los productos. La idea con mayor puntaje total será la más favorable.
- Diseño de componentes: Considerando las ideas seleccionadas a partir de las matrices de ponderación, en la sección 1.4 se indica la información relevante de cada componente que forma el sistema de pedales. En esta se indican los diseños de cada pieza, las medidas y la función de cada una.
- Cálculos: Se llevó a cabo un análisis dinámico de cargas no completamente invertidas en los distintos componentes, considerando la aplicación de tres distintas cargas obtenidas de forma experimental mediante el uso de dinamómetro. Se analizaron las secciones críticas de los componentes que soportan cargas mayores y utilizando la teoría de falla correspondiente a cada material, se calculó la vida o el número de ciclos que soportarían bajo las cargas planteadas.
- Fase de pruebas: Se desarrolló un protocolo de pruebas que valida o no los resultados

obtenidos en la sección de cálculos según los casos a los que estaría sometido el modelo físico.

- Ajustes en el diseño: Basado en los criterios planteados en el protocolo de pruebas, se realizaron ajustes en el diseño para mejorar los aspectos del prototipo que no fueron satisfactorios.

## 6.2. Definición de requisitos

A continuación se definen las características técnicas y funcionales que debe cumplir el sistema de pedales para ser considerado apto para su uso.

Cuadro 1: Identificación de códigos

ID	Significado
DM	Diseño Mecánico
DE	Diseño Eléctrico
SG	Seguridad
CS	Costos

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2: Requisitos

Código	Descripción
DM01	Para los cálculos, las cargas máximas aplicadas por los pies de una persona deben obtenerse experimentalmente.
DM02	El <i>Force Feedback</i> de los pedales de Cessna 172 debe ser de al menos 10 N.
DM03	Los pedales serán accesibles para personas que midan entre 1.58 m y 1.91 m de altura.
DM04	El sistema de pedales estará conformado por 2 pedales
DM05	Los materiales por utilizar para la construcción de los pedales deben tener una vida útil de al menos 6,000 horas.
DM06	El sistema de pedales no debe superar los 7 kg.
DM07	Se debe asegurar que las uniones esten libres de fricción de modo que la resistencia a la rotación del prototipo provenga enteramente del mecanismo de retoalimentación de fuerza.
DM08	Los pedales deben soportar una carga de al menos 100 kilogramos.
DM09	Los pedales utilizarán resortes de compresión con los cuales los pedales regresarán a su posición inicial.
DE01	Los cables que conectan los potenciómetros de la base y pedales a la interfaz no deben interferir con el desplazamiento de los pedales.
DE02	Cada pedal dispondrá de un sensor potenciométrico para registrar la actividad del freno y un potenciómetro más para la profundidad de giro.
DE03	Los sensores encargados de recibir información no deben ser impactados por los pedales.
SG01	El factor de seguridad mínimo contra la fatiga debe ser de 1.2
SG02	El factor de seguridad mínimo para las piezas diseñadas de madera debe ser 3.
SG03	Los pedales no tendrán partes punzantes o cortantes que puedan dañar al usuario.
CS01	Los materiales para llevar a cabo el conjunto de pedales no superarán los Q500.

Fuente: Elaboración propia

### 6.3. Creación y selección de ideas

Se crearon matrices de ponderación para las diferentes ideas y consideraciones utilizadas en el diseño final del sistema de pedales. Estas matrices incluyeron varios criterios importantes y se ponderaron utilizando un factor de peso. Para el diseño final, se eligió la opción con la mayor ponderación total. Los criterios se evaluaron del 1 al 5, siendo 5 la mayor ponderación. Los criterios que se evaluarán en las matrices de ponderación se detallan a continuación:

#### Criterios

- **Complejidad para maquinar:** este criterio considera el proceso de manufactura, el cual se refiere a los métodos y técnicas específicas que se deben utilizar para fabricar una pieza. Algunas piezas pueden requerir procesos avanzados como fresado, torneado, corte por láser, o impresión 3D. Otro factor influyente es el tiempo de maquinado, el cual se refiere a cuánto tiempo se necesita para completar el proceso de fabricación de la pieza, este puede verse influenciado por la complejidad del diseño, el material utilizado, la eficiencia de las máquinas y herramientas empleadas. Piezas con geometrías complejas o detalles finos suelen requerir más tiempo de maquinado. Por último, la cantidad de herramientas necesarias, la cual se refiere a la cantidad y diversidad de herramientas de corte o máquinas requeridas para fabricar una pieza. Piezas más complejas pueden necesitar múltiples herramientas y configuraciones de máquina, lo que puede incrementar tanto el tiempo de preparación como el costo. Por ejemplo, puede ser necesario utilizar diferentes tipos de fresas, brocas, o incluso máquinas especializadas para lograr todos los detalles de la pieza.
- **Complejidad de instalación:** este criterio se centra en la integración de sensores y se refiere a los cambios necesarios en la geometría del diseño o de las piezas individuales del módulo para implementar el sensor. Por ejemplo, pueden ser necesarios agujeros adicionales en la madera del pedal para colocar el sensor, así como la fabricación de piezas adicionales para adaptar el sensor al diseño existente.
- **Complejidad de programación:** este criterio considera cuántas líneas de código serán necesarias para la implementación del sensor. Un mayor número de líneas de código puede implicar una mayor complejidad, ya que aumenta la probabilidad de errores y puede requerir más tiempo para desarrollar, depurar y mantener. Además, las funciones o métodos son necesarios para la implementación del sensor, por ejemplo funciones y métodos más complejos pueden necesitar un mayor esfuerzo de programación y pruebas exhaustivas para asegurar su correcto funcionamiento. Y por último la facilidad y disponibilidad de librerías que faciliten la programación.
- **Estabilidad:** este criterio se refiere a la capacidad del diseño a construir para mantenerse firme y en equilibrio durante su funcionamiento. Para esto se considera la cantidad de puntos de apoyo del mecanismo, ya que la estabilidad de un mecanismo está directamente relacionada con el número de puntos de apoyo que tiene. Los puntos de apoyo son las áreas o elementos donde el mecanismo se sostiene o se fija a una superficie.
- **Cantidad de componentes:** este criterio se refiere a la cantidad total de piezas individuales que componen el diseño. Un diseño con menos componentes suele ser preferible,

ya que simplifica el proceso de ensamblaje y reduce el riesgo de errores durante la fabricación. También la cantidad de componentes está directamente relacionada con el tiempo necesario para unir todas las piezas. Un diseño con menos componentes generalmente requiere menos tiempo para ensamblarse. Y menos componentes pueden significar un ensamblaje más sencillo.

- **Diseño del sistema:** el diseño a construir se asemeja a la estética del módulo de pedales de un Cessna 172.
- **Costo:** este criterio se considera en la compra de los materiales y sensores, la puntuación más alta corresponde a aquellos que son de menor costo.
- **Durabilidad:** Este criterio está enfocado mayormente en los materiales y considera la susceptibilidad a daños con el tiempo, esto se refiere a la capacidad del material para resistir el desgaste, la fatiga y el deterioro general a lo largo del tiempo. Los materiales pueden debilitarse debido a ciclos repetidos de carga. También la resistencia a la corrosión debido a que la elección de materiales con alta resistencia a la corrosión puede prolongar significativamente la vida útil. Y por último, la resistencia a la humedad y el agua lo cual implica la capacidad del material para soportar la exposición a la humedad y al agua sin degradarse ni perder sus propiedades estructurales.
- **Resistencia:** Se basa en el valor de la resistencia a la fatiga de cada material. Se asignó la mayor puntuación al material con el factor más elevado de resistencia a la fatiga.

### 6.3.1. Diseño y construcción

Para establecer el diseño y la construcción del sistema de pedales, se tomaron en cuenta 3 vías factibles de diseño para el sistema de pedales como: pedales individuales, unidos por un balancín y debajo colocar carriles según la profundidad necesaria o unidos por 2 balancines. El resultado de la selección y los factores a considerar por cada uno se observan en el cuadro 3.

Cuadro 3: Matriz de ponderación para los materiales del sistema de pedales

Criterio	Factor de peso	Pedales individuales	Un balancín	Dos balancines
Complejidad para maquinar	0.25	2	3	3
Estabilidad	0.3	5	5	2
Cantidad de componentes	0.15	2	4	3
Peso	0.2	2	4	3
Diseño del sistema	0.1	3	5	2
Total	1	3	4.15	2.6

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2. Materiales

Piezas como ejes, perfiles y soportes reciben el peso y la fuerza aplicada a los pedales, por lo que fue necesario considerar los posibles materiales y estos también se ponderaron

para decidir cuál sería el indicado. En el cuadro 4 se observa como el aluminio destaca sobre madera y acero.

Los pedales serán de madera sólida, específicamente pino para reducir el peso del prototipo y facilitar la construcción, y los soportes que sostienen los pedales se maquinarán con plywood debido a la disposición del material. Para el primer prototipo, los soportes se fabricarán con material PETG, sin embargo, los resultados obtenidos en la sección 1.5 se basan en las propiedades del aluminio, asumiendo que los soportes están fabricados con ese material.

Cuadro 4: Matriz de ponderación para los materiales del sistema de pedales

Criterio	Factor de peso	Madera	Acero	Aluminio
Costo	0.15	5	2	4
Complejidad para maquinar	0.25	3	3	5
Durabilidad	0.1	2	4	3
Resistencia	0.2	2	5	4
Peso	0.1	4	2	3
Tiempo de maquinado	0.2	5	2	4
Total	1	3.5	3.05	4.05

Fuente: Elaboración propia

### 6.3.3. Sensores

La selección de sensores es importante porque deben ser precisos, económicos, ligeros y fáciles de programar. Para esta aplicación en particular, se consideraron tres sensores, de los cuales el potenciómetro y el sensor de Efecto Hall son los más utilizados. El potenciómetro es un sensor menos complicado de instalar, menos difícil de programar y, aunque no es el sensor más preciso, sí lee los datos según sea necesario. El Cuadro 5 muestra los factores y las ponderaciones relacionados con la selección del sensor potenciómetro.

Cuadro 5: Matriz de ponderación para los sensores del sistema de pedales

Criterio	Factor de peso	Potenciómetros	Efecto Hall	Ángulo de inclinación
Costo	0.2	5	4	3
Tamaño	0.1	3	4	4
Precisión	0.25	3	5	2
Peso	0.1	2	3	3
Vida útil	0.1	3	5	2
Complejidad de instalación	0.15	4	1	3
Complejidad de programación	0.1	5	1	1
Total	1	3.65	3.4	2.55

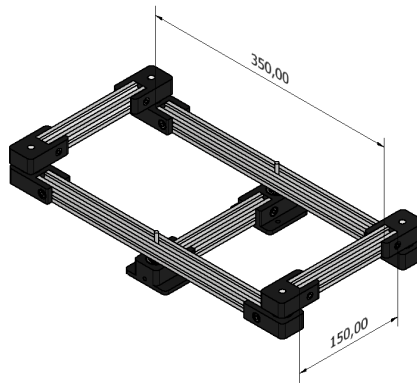
Fuente: Elaboración propia

## 6.4. Diseño preliminar

### Base de los pedales

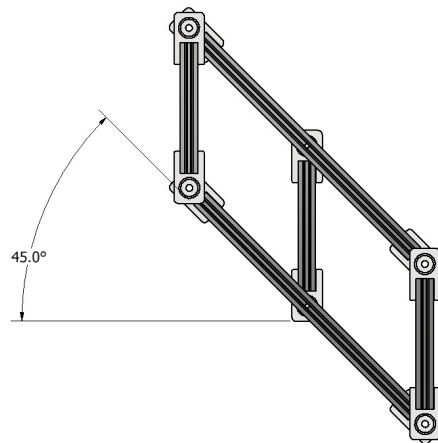
La estructura de la base está construida por cuatro perfiles de aluminio extruido T - slot, cada uno con medidas de 20 x 20 milímetros, montados sobre un quinto perfil. La base mide 350 milímetros de ancho y 150 milímetros de largo, con un perfil en el centro que actúa como un balancín de 150 milímetros de largo. Las uniones a los extremos están diseñadas para colocar un eje junto con un rodamiento, esto permite el desplazamiento de la base al accionar un pedal. Es importante mencionar que dichas uniones se conectan a los perfiles mediante tornillos. La base y las uniones se observan en la Figura 14. El rango de movimiento de la rotación se ilustra en la Figura 15, que muestra el movimiento al presionar el pedal izquierdo. El mismo efecto se produce al presionar el pedal con el pie derecho.

Figura 14: Base de pedales



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

Figura 15: Rotación de la base al presionar el pedal derecho

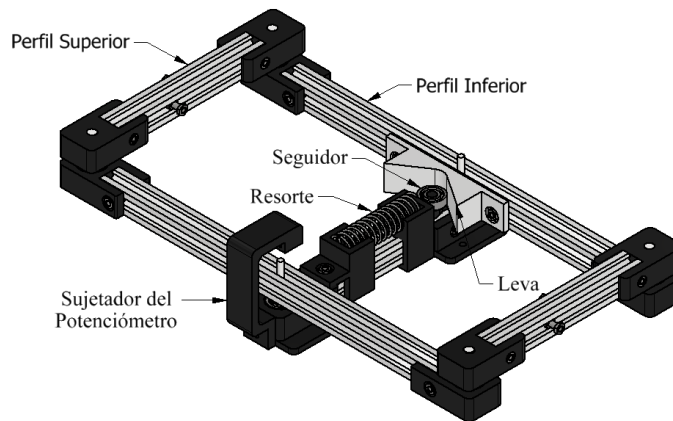


Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk Inc.

## Sistema de retroalimentación de fuerza

El sistema de retroalimentación de fuerza, también conocido como *Force Feedback*, se compone de un soporte superior que alberga el extremo de un resorte, una leva que alberga el extremo opuesto del resorte y un seguidor. Al presionar un pedal, los perfiles inferior y superior se inclinan hacia el pedal presionado, y el resorte se encoje por efecto de la leva y el seguidor. Sin embargo, el resorte ejerce una fuerza de igual magnitud y opuesta, simulando la retroalimentación de la fuerza. Los perfiles se equilibran cuando se deja de presionar el pedal. El sistema terminado se muestra en la Figura 16.

Figura 16: Sistema de *Force Feedback*

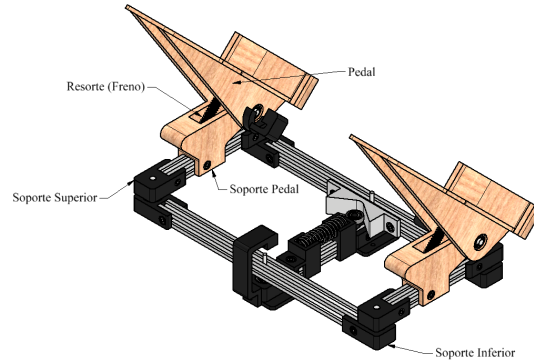


Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk Inc.

## Soporte de los pedales

Cada pedal debe tener un freno y un soporte para mantener el pedal en una posición de  $45^\circ$ . El resorte detrás del pedal permite al usuario tener la sensación de retroalimentación de fuerza y al pedal mantenerse en la posición requerida. La Figura 17 muestra la ubicación y posición del pedal, junto con el resorte apoyado en el soporte. Se muestra el resto de la estructura para mayor claridad.

Figura 17: Piezas de soporte del pedal



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

### Prototipo del sistema de pedales

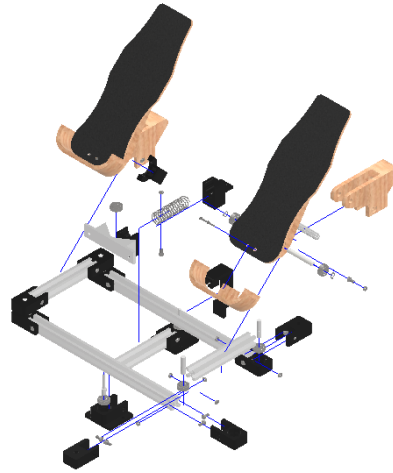
Como se muestra en la Figura 18, el primer diseño del prototipo del sistema de pedales se presenta con el conjunto de piezas mencionado anteriormente. Y en la Figura 19 es posible observar las distintas piezas que componen la base en su totalidad de forma individual. En el apartado de anexos se observan los planos de cada componente con mayor detalle.

Figura 18: Sistema de pedales



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

Figura 19: Explosión del pedales



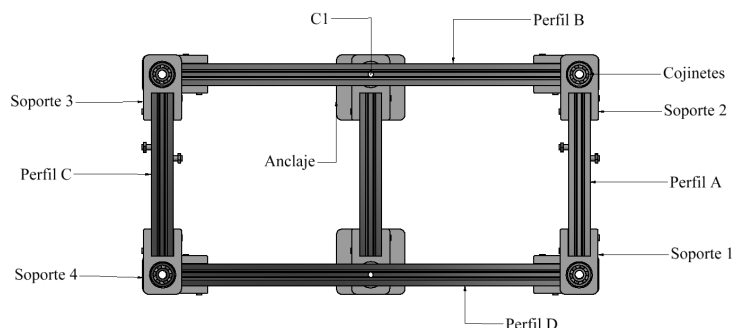
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk Inc.

## 6.5. Cálculos

Se realizó un análisis dinámico de cargas no completamente invertidas. A continuación se detallan los cálculos correspondientes que se llevaron a cabo: análisis para los perfiles A y B, factor de seguridad correspondiente a los tornillos de los soportes y el anclaje, análisis de los ejes que unen los soportes, análisis de los cojinetes, análisis de los soportes suponiendo que son de aluminio y análisis de los pedales y su respectivo soporte, los componentes mencionados se observan en la Figura 20.

Las fuerzas aplicadas sobre el sistema de pedales varían a lo largo de la utilización del prototipo, por lo que se trata de cargas dinámicas, sin embargo, estas fuerzas al ser de diferente magnitud deben considerarse como cargas dinámicas de amplitud variable en materiales dúctiles y por lo tanto se debe analizar todo el sistema según el método de acumulación de fatiga. La Figura 20 muestra la señalización de las partes que se utilizaron para el análisis, indicando que los cálculos correspondientes para los perfiles A y B son los mismos para los perfiles C y D de forma paralela. El cuadro 6 indica los datos geométricos del perfil V - slot que fue analizado.

Figura 20: Vista superior de la base, señalización de análisis



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk Inc

Cuadro 6: Datos de la geometría

	Valores	Unidades
Área	0.000155	$m^2$
Inercia	6.99E-09	$m^4$
Momento Polar	1.40E-08	$m^4$

Fuente: Elaboración propia

Para llevar a cabo este análisis, es necesario caracterizar el esfuerzo en una serie de casos específicos de diferentes amplitud. Este grupo de casos se supone que se aplica al sistema con el objetivo de determinar la cantidad de esfuerzo que este grupo de casos puede soportar. El primer paso es analizar las cargas que el sistema tendría que soportar. Se analizaron tres casos de carga diferentes, y para todos, el mínimo se consideró el peso del pie dado que siempre está apoyado en el mecanismo.

- Accionamiento de los frenos: Se consideró como un caso en el cual la fuerza mínima aplicada a los pedales es el peso del pie y el máximo es la fuerza que es posible ejercer para frenar.
- Accionamiento del mecanismo de giro: Se consideró como un caso en el cual la fuerza mínima aplicada a los pedales es el peso del pie y el máximo es la fuerza de diseño necesaria para accionar el mecanismo.
- Accionamiento en situación de emergencia: Se consideró como un caso en el cual la fuerza mínima aplicada a los pedales es el peso del pie y el máximo es la fuerza máxima que es posible ejercer con la pierna al momento de accionar el mecanismo.

Para el análisis de perfiles V-slot, soportes y ejes se siguió el procedimiento de acumulación de fatiga para calcular la vida correspondiente de cada elemento. Este procedimiento se explica a continuación para evitar repetirlo en el apartado correspondiente de cada uno de los elementos que lo utilizan. Para el resto de componentes el análisis se explica en su respectivo apartado.

Partiendo de los casos de carga mencionados anteriormente el primer paso fue calcular los esfuerzos medios y alternantes, luego mediante dichos esfuerzos y las propiedades del material correspondiente se utilizó la teoría de falla de Gerber para calcular la amplitud de la resistencia a la fatiga, la ecuación (1) indica la teoría de falla.

$$S_a = \frac{r^2 S_{ut}^2}{2S_e} \left( -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2S_e}{rS_{ut}} \right)^2} \right) \quad (1)$$

Las propiedades del aluminio correspondiente a los soportes y al acero correspondiente a los ejes se detallan en el Cuadro 7.

Cuadro 7: Propiedades del aluminio 6061 y acero 1018

Propiedad	Simbología	Aluminio 6061	Acero 1018 CD
Resistencia a la fluencia (MPa)	$S_y$	48.3	370
Resistencia última a la tensión (MPa)	$S_{ut}$	117	440
Límite de resistencia a la fatiga (MPa)	$S_e$	83.17	157

Fuente: Material Property Data, 2023

La resistencia calculada fue luego comparada con el esfuerzo alternante bajo un criterio simple, si la resistencia era mayor la pieza resiste infinitas repeticiones del ciclo analizado, de lo contrario resiste un número finito de repeticiones. De la ecuación (2) a (5) se muestran los datos utilizados para determinar el criterio.

$$n_i = \begin{cases} \infty & , \sigma_a < S_a \\ \left( \frac{S_f}{a} \right)^{-1/b} & , \sigma_a > S_a \end{cases} \quad (2)$$

donde,

$$s_f = \frac{\sigma_a}{1 - \left( \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right)^2} \quad (3)$$

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} \quad (4)$$

$$a = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{f S_{ut}}{S_e} \right) \quad (5)$$

Por último se utilizó la regla de Miner, ecuación (6), para estimar la vida de la pieza considerando la acumulación de los ciclos analizados, donde  $N$  es el número de ciclos considerando la acumulación y  $n_i$  el número de ciclos de cada caso analizado.

$$N = \frac{1}{\left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{1}{n_3} \right)} \quad (6)$$

### 6.5.1. Determinación experimental de fuerzas

Para determinar las fuerzas consideradas en cada ciclo se realizó un proceso experimental en el cual utilizando un dinamómetro se midieron las fuerzas con 5 personas distintas y se promediaron los resultados. Para la experimentación se construyeron prototipos a escala real mediante impresión 3d que sirvieron para realizar los movimientos reales del mecanismo en operación y el dinamómetro se ancló a la base del pedal mediante alambre galvanizado. A continuación se pueden observar algunas imágenes de referencia del proceso y el Cuadro 8 indica los resultados obtenidos.

Figura 21: Medición de fuerza ejercida por el peso del pie



Figura 22: Medición de fuerza máxima ejercida para rotar el mecanismo



Figura 23: Medición de fuerza máxima de frenado



Cuadro 8: Fuerzas obtenidas por el dinamómetro

Fuerza	Promedio (N)
Peso del pie	53.4
Fuerza máxima de frenado	71.5
Fuerza máxima ejercida para rotar el mecanismo	196.1

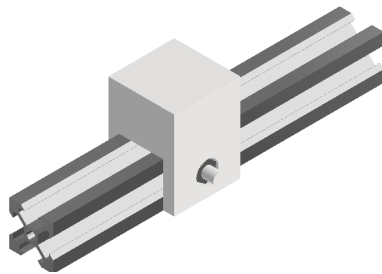
Fuente: Elaboración propia

### 6.5.2. Análisis en Ansys

Conociendo las fuerzas aplicadas en cada uno de los casos considerados, el análisis comenzó con el perfil A de la base, el cual se encuentra atornillado en ambos extremos como se observa en la Figura 20, por lo que se consideró como un perfil con doble empotramiento bajo tres cargas. Llevando a cabo el análisis se llegó a la conclusión de que el perfil es estáticamente indeterminado. Para solucionar este problema, se empleó un análisis estático estructural con Ansys para determinar los valores de las reacciones y los momentos en los extremos para cada caso y la fuerza de diseño. A continuación se proporcionan los pasos necesarios para llevar a cabo el análisis mencionado.

Para facilitar el análisis, se simplificó la geometría del perfil A y no fue necesario utilizar el resto de perfiles o piezas del módulo, únicamente se utilizó el perfil analizado y el soporte del pedal que se muestran en la Figura 23. Esto proporcionó una superficie más fácil para colocar cargas y los extremos del perfil se colocaron como soportes fijos de forma simple. La Figura 24 muestra el ensamble simplificado.

Figura 24: Modelo de análisis simplificado



Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk Inc

Se utilizó el mallado más fino dada la complejidad de la sección transversal del perfil, de esta forma se logró mejores resultados ya que el mallado fue capaz de capturar correctamente dicha geometría.

Figura 25: Modelo de análisis en Ansys

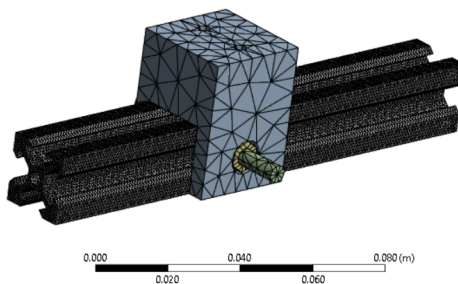


Imagen por cortesía de ANSYS, Inc.

### Cargas

Las cargas que se aplicaron sobre la superficie del soporte corresponden a las cargas mostradas en el Cuadro 8 que están en la sección 1.5.1., para esto se trasladaron las cargas hasta dicho soporte con su respectivo momento de fuerza-par de forma que el modelo simplificado recibiera las mismas cargas que recibiría el modelo completo. Esto se puede observar en la Figura 26.

Figura 26: Modelo de análisis en Ansys

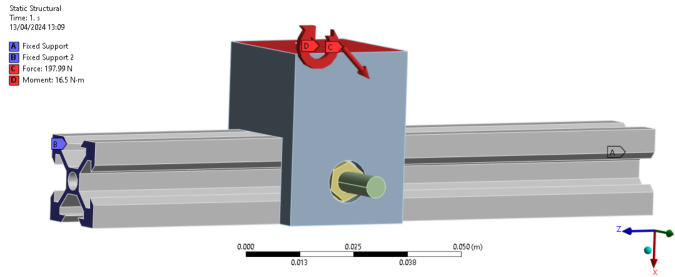


Imagen por cortesía de ANSYS, Inc.

## Resultados

Los resultados obtenidos son las reacciones y momentos de reacción en ambos soportes, estos se presentan del Cuadro 9 al 12 para cada fuerza obtenida experimentalmente y la fuerza de diseño.

Cuadro 9: Resultados obtenidos para 53.4 Newtons

Reacciones y momentos	Resultados
$R_{x1}$ (N)	-17.061
$R_{y1}$ (N)	-25.052
$M_1$ (N*m)	0.3123
$R_{x2}$ (N)	-20.939
$R_{y2}$ (N)	63.052
$M_2$ (N*m)	-1.66

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 10: Resultados obtenidos para 71.5 Newtons

Reacciones y momentos	Resultados
$R_{x1}$ (N)	-22.901
$R_{y1}$ (N)	-33.291
$M_1$ (N*m)	0.42184
$R_{x2}$ (N)	-28.099
$R_{y2}$ (N)	84.291
$M_2$ (N*m)	-2.221

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 11: Resultados obtenidos para 150 Newtons

Reacciones y momentos	Resultados
$R_{x1}$ (N)	-48.27
$R_{y1}$ (N)	-29.98
$M_1$ (N*m)	1.19
$R_{x2}$ (N)	-58.23
$R_{y2}$ (N)	136.48
$M_2$ (N*m)	-3.71

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 12: Resultados obtenidos para 196.1 Newtons

Reacciones y momentos	Resultados
$R_{x1}$ (N)	-62.86
$R_{y1}$ (N)	-91.63
$M_1$ (N*m)	1.156
$R_{x2}$ (N)	-77.136
$R_{y2}$ (N)	231.63
$M_2$ (N*m)	-6.1

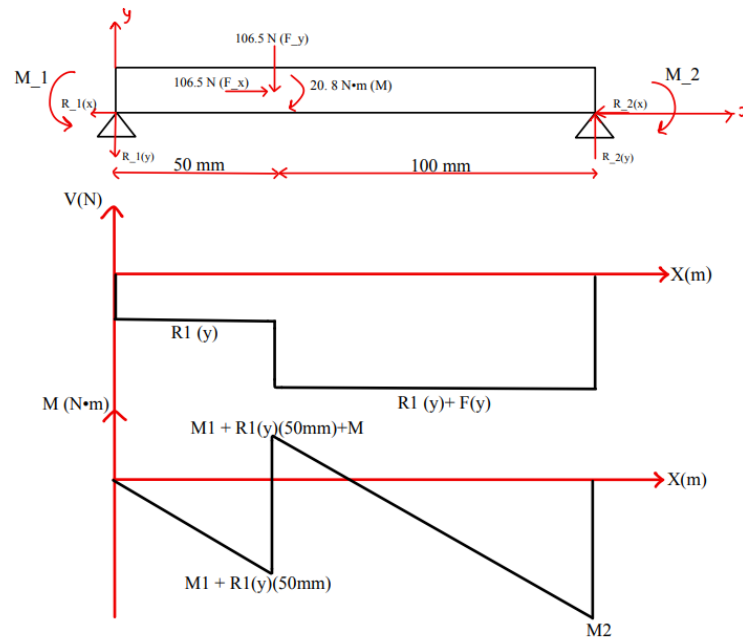
Fuente: Elaboración propia

### 6.5.3. Perfil A

Se definió como perfil A al perfil longitudinal que soporta la estructura de cada pedal, considerando la simetría del sistema sólo se analizó uno de los perfiles que sostiene el pedal, como se explicó anteriormente. Este perfil está apoyado en soportes laterales atornillados por lo que se consideró como una viga doblemente empotrada, como se explicó en la sección anterior, las reacciones en ambos apoyos se obtuvieron mediante un análisis de elementos finitos. Partiendo de dichos resultados se analizaron los esfuerzos a los que está sometido el perfil y se realizaron diagramas de corte y momento.

Considerando que el momento máximo se produce en el punto de apoyo de la base que sostiene al pedal como se puede observar en los diagramas de corte y momento en la Figura 27, se tomó esta como la sección crítica a analizar. Se calculó el esfuerzo máximo considerando la superposición entre el esfuerzo axial y el esfuerzo por flexión, luego, mediante las propiedades del aluminio y los esfuerzos calculados se realizó el procedimiento para estimar la vida útil, procedimiento el cual fue explicado en la sección 1.5.

Figura 27: Diagrama de cuerpo libre, de corte y momento para el perfil A



Se llegó a la conclusión que el perfil tiene vida infinita según los tres casos de esfuerzo considerados. El Cuadro 13 indica los valores obtenidos.

Cuadro 13: Resultados obtenidos para el perfil A

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	5.93	8.04	16.30
Esfuerzo Mínimo (MPa)	22.28	22.28	22.28
Esfuerzo Alternante (MPa)	-8.17	-7.12	-2.99
Esfuerzo Medio (MPa)	14.10	15.16	19.29
Sa (MPa)	45.58	39.70	16.24
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

#### 6.5.4. Perfil B

Se definió como perfil B, al perfil transversal que pivota sobre el centro, considerando la simetría los resultados son los mismos para el perfil D, las reacciones en los soporte 2 y 3 son iguales y con dirección contraria a como se analizaron en el perfil A por tercera ley de Newton. Partiendo de estas fuerzas se calcularon las reacciones en el soporte central 1 mediante ecuaciones de equilibrio.

Considerando que el momento máximo se produce en el soporte central como se puede observar en los diagramas de corte y momento de la figura 28 y 29, (los diagramas se presetan en los planos y - z, x - z por la flexión en dos planos), y que la torsión se produce a lo largo

de todo el perfil, se tomó el soporte central como la sección crítica a analizar. Se calculó el esfuerzo máximo considerando la combinación entre el esfuerzo por flexión y el esfuerzo cortante por torsión, luego, mediante las propiedades del aluminio y los esfuerzos calculados se realizó el procedimiento para estimar la vida útil.

Figura 28: Diagrama de cuerpo libre, de corte y momento plano Y-Z

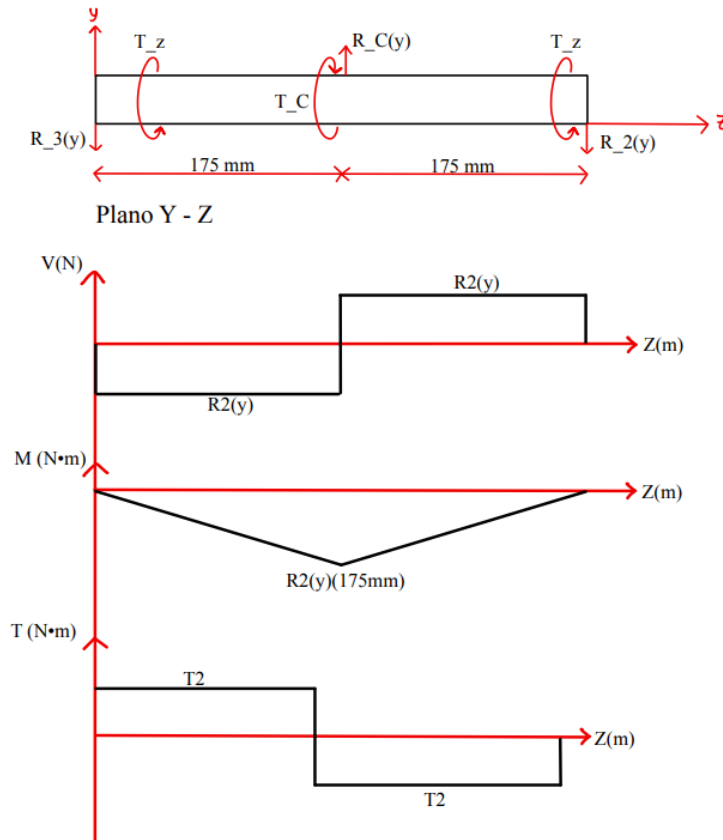
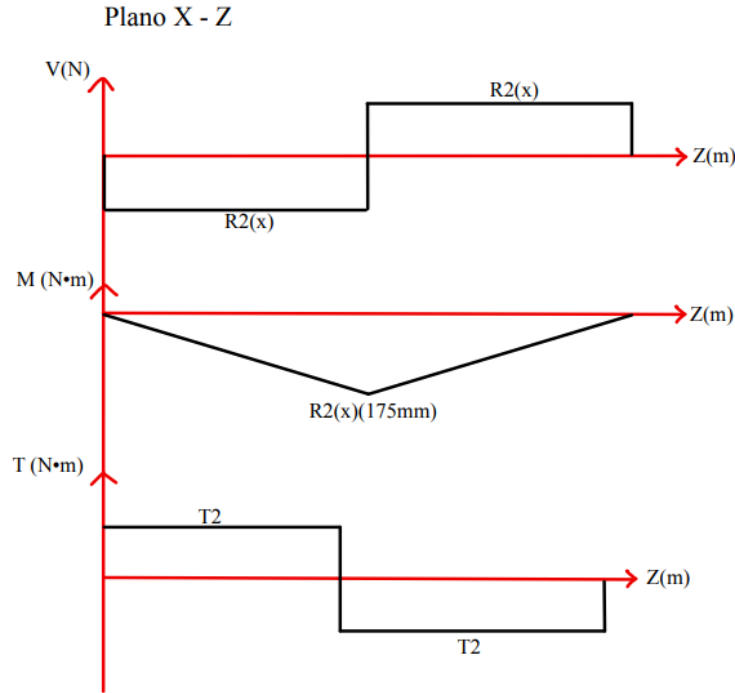


Figura 29: Diagrama de corte y momento en el plano X-Z



Se llegó a la conclusión que el perfil tiene vida infinita según los tres casos de esfuerzo considerados. El Cuadro 14 indica los valores obtenidos.

Cuadro 14: Resultados obtenidos para el perfil B

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	22.57	113.31	186.07
Esfuerzo Mínimo (MPa)	16.88	16.88	16.88
Esfuerzo Alternante (MPa)	2.85	48.22	84.59
Esfuerzo Medio (MPa)	19.73	65.09	101.47
r	0.14	0.74	0.83
Sa (MPa)	15.26	52.57	55.88
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

### 6.5.5. Tornillos

Se analizaron las uniones pernadas de los soportes y el anclaje a la base. Para los soportes, se utilizaron tornillos de cabeza tipo martillo M5x20, mientras que para el anclaje, se utilizaron tornillos de cabeza hexagonal de grado 4.6. El análisis de ambas uniones y las propiedades de los pernos utilizados se detallan a continuación.

Cuadro 15: Propiedades del perno M3x20 grado 4.6

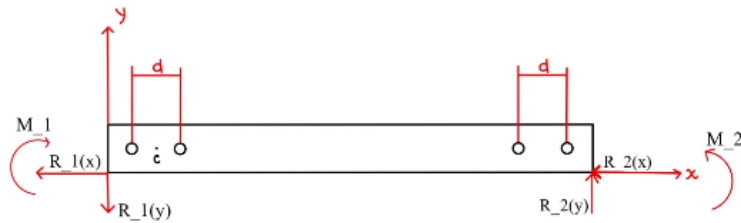
Propiedad	Valor (MPa)
Resistencia última a la tensión	440
Resistencia a la fluencia	240
resistencia de prueba	225

Fuente: Elaboración propia

### Uniones pernadas de los soportes

Cada uno de los perfiles está unido por pernos a los soportes por lo que el caso analizado fue el de cortante excéntrico ya que las cargas de corte se encuentran aplicadas a cierta distancia de los pernos. El soporte 3 es el más crítico, por lo tanto si los tornillos correspondientes a este soporte tienen un factor de seguridad aceptable entonces el resto de los tornillos a utilizar tendrán factores de seguridad mayores.

Figura 30: Diagrama de cuerpo libre de la viga A con los tornillos



Partiendo del DCL de la Figura 30, se calculó el cortante primario y secundario con los cuales se calcularon los distintos factores de seguridad teniendo en cuenta las propiedades del tornillo y el aluminio de los soportes. El Cuadro 16 indica los valores de factor de seguridad obtenidos para los tornillos en el soporte crítico.

Cuadro 16: Factores de seguridad para el soporte 3

Casos	Factor de seguridad
Cortante en el perno	1.71
Aplastamiento de los elementos	2.24
Aplastamiento de los pernos	11.12
Cortante del borde	2.24

Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta el factor de seguridad mínimo de 1.2 planteado en los requerimientos, los tornillos del soporte 3 cumplen y por lo tanto los demás soportes también.

### Unión pernada del anclaje

En el caso de la unión de anclaje, las fuerzas de empuje y las fuerzas de compresión que se aplican al sistema de pedales generan fuerzas de corte excéntricas. Por esta razón, se

examinaron también como tornillos bajo cortante excéntrico.

Cuadro 17: Factores de seguridad para el anclaje

Casos	Factor de seguridad
Cortante en el perno	15.92
Aplastamiento de los elementos	20.85
Aplastamiento de los pernos	103.61
Cortante del borde	5.21

Fuente: Elaboración propia

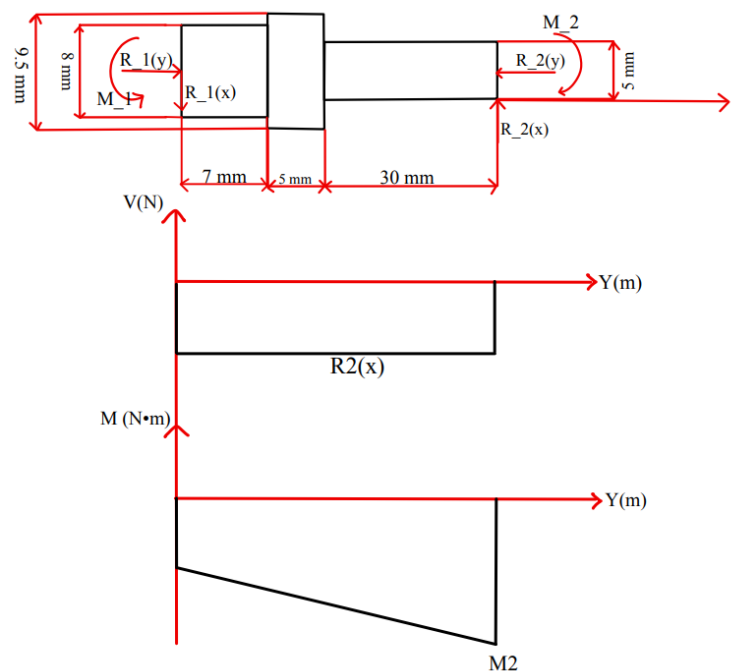
Tomando en cuenta el factor de seguridad mínimo de 1.2 planteado en los requerimientos los tornillos del anclaje cumplen.

### 6.5.6. Ejes

El análisis se llevó a cabo únicamente para el eje que se encuentra en el soporte 2 porque este es el más crítico, de esta forma los 3 ejes restantes soportarán las cargas. Se analizó como un elemento sometido a flexión y corte. Considerando la relación entre largo y diámetro fue necesario tomar en cuenta el cortante por flexión.

El diagrama de corte y momento que se muestra en la Figura 31 indica que el momento máximo se encuentra en el extremo de menor diámetro. Físicamente está colocado de forma vertical en el modelo, pero por simplicidad en el análisis se dibujó de forma horizontal.

Figura 31: Diagrama de corte y momento correspondiente al eje del soporte 2



Se obtuvo un esfuerzo de Von Mises por la combinación de esfuerzos, luego utilizando las propiedades del acero 1018 que se indican en el Cuadro 7, se realizó el procedimiento para estimar la vida útil. En conclusión los ejes tienen vida infinita para los tres casos de esfuerzo considerados. El Cuadro 18 indica los valores obtenidos. Los ejes por lo tanto tendrían vida infinita.

Cuadro 18: Resultados obtenidos para el eje en el punto 2

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	106.23	177.38	291.76
Esfuerzo Mínimo (MPa)	79.40	79.40	79.40
Esfuerzo Alternante (MPa)	13.42	48.99	106.18
Esfuerzo Medio (MPa)	92.81	128.39	185.58
r	0.14	0.38	0.57
Sa (MPa)	52.01	100.61	120.83
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

### 6.5.7. Cojinetes

Los cojinetes se utilizan en las esquinas, se colocaron en los soportes y permiten el giro de la base evitando la fricción. El cojinete más crítico se encuentra en el soporte 2, por ello se estimó el tiempo de vida en horas según los datos obtenidos por el catálogo de NTN para cojinetes con el código 608 zz (cojinete rígido de bolas de tapas metálicas).

Para el análisis se consideró que estos soportan carga axial y radial por lo que se calcula una carga equivalente. De la misma forma se utilizaron estas mismas fuerzas que actúan como reacciones en el cojinete correspondientes al caso 3 en el cual ocurren las mayores fuerzas.

Suponiendo en un caso crítico donde se realiza un movimiento completo del sistema de forma rápida, desde una posición a  $-45^\circ$  hasta una posición a  $45^\circ$  en un tiempo de 0.5 segundos, se calculó una velocidad angular máxima para el cálculo de la vida, ya que los cojinetes no giran de forma continua. Utilizando la ecuación (7) se obtuvo la velocidad en rpm en para este caso.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{t} = \frac{90^\circ}{0.5s} \left( \frac{\frac{2\pi}{360^\circ} \frac{1rev}{2\pi}}{\frac{1min}{60s}} \right) = 30rpm \quad (7)$$

Utilizando el procedimiento del catálogo de NTN la vida nominal al 90% es de  $8.87 \times 10^8$  horas, lo que indica un tiempo de vida sumamente alto por lo que se consideró aceptable.

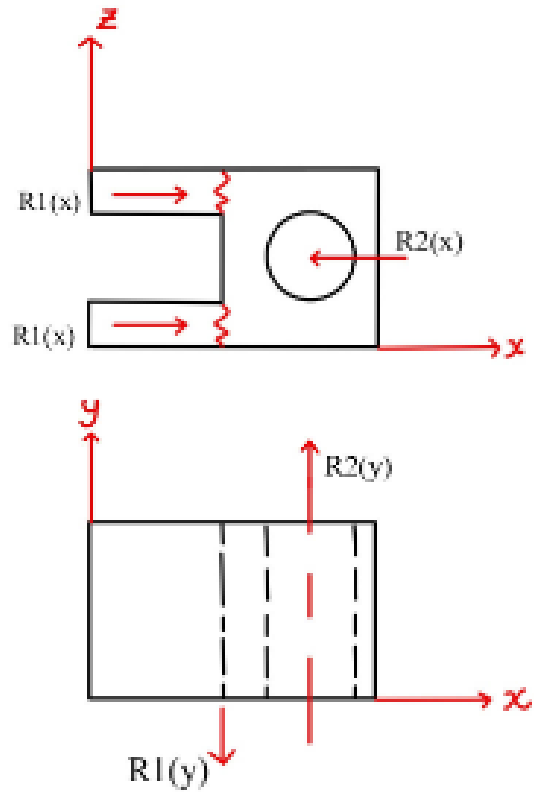
Se utilizan dos cojinetes más para la rotación de cada pedal que permite la acción de freno, sin embargo, estos se utilizan poco ya que se accionan a menor velocidad y soportan menor carga en comparación a los cojinetes que se encuentran en las esquinas, por lo tanto se omitió el cálculo considerando que la vida sería aún mayor que la anteriormente calculada.

### 6.5.8. Soportes

La geometría de los soportes se muestra en la Figura 18. En esta puede observarse que en un caso crítico ambas partes que están atornilladas al perfil podrían experimentar un corte y esfuerzo por compresión, esto ocurre porque el sistema de retroalimentación de fuerza se opone al giro de la base y ocasiona los esfuerzos anteriormente mencionados. Por ello se calculó esfuerzo de von Mises con el cual mediante las propiedades del aluminio y los esfuerzos calculados se realizó el procedimiento para estimar la vida útil.

Por otro lado el agujero que se muestra en la Figura 32 se utiliza para colocar el rodamiento, este experimenta un esfuerzo a tensión en el plano X-Z. Los cuadros 19 y 20 muestran los datos obtenidos según el análisis.

Figura 32: Diagrama de cuerpo libre correspondiente al soporte 2



Cuadro 19: Resultados obtenidos para las partes atornilladas al perfil

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	0.74	1.22	0.85
Esfuerzo Mínimo (MPa)	0.56	0.56	0.56
Esfuerzo Alternante (MPa)	0.09	0.33	0.15
Esfuerzo Medio (MPa)	0.65	0.89	0.70
r	0.14	0.37	0.21
Sa (MPa)	15.25	33.66	21.30
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 20: Resultados obtenidos para el agujero en el soporte

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	0.49	1.02	1.10
Esfuerzo Mínimo (MPa)	0.37	0.37	0.37
Esfuerzo Alternante (MPa)	0.06	0.33	0.37
Esfuerzo Medio (MPa)	0.43	0.69	0.73
r	0.15	0.47	0.50
Sa (MPa)	15.42	39.80	41.45
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

Los soportes por lo tanto tendrían vida infinita.

### 6.5.9. Pedales

La estructura de los pedales que comprende el soporte y el pedal fueron construidas a partir de madera de pino mediante una herramienta de router CNC para capturar la geometría en su totalidad. Para el análisis de estas piezas la teoría de falla por fatiga de Gerber ya no es aplicable por lo que para estas piezas el análisis que valida la geometría y los esfuerzos que se aplican se explica a continuación.

#### Propiedades de la madera

La madera a utilizar tiene una clasificación C24 según la escala de *British Standards Institution* por ser un pino de la región centroamericana y del caribe con un aspecto visual intermedio. Según esta clasificación las propiedades se listan en el Cuadro 21.

Cuadro 21: Propiedades de la madera

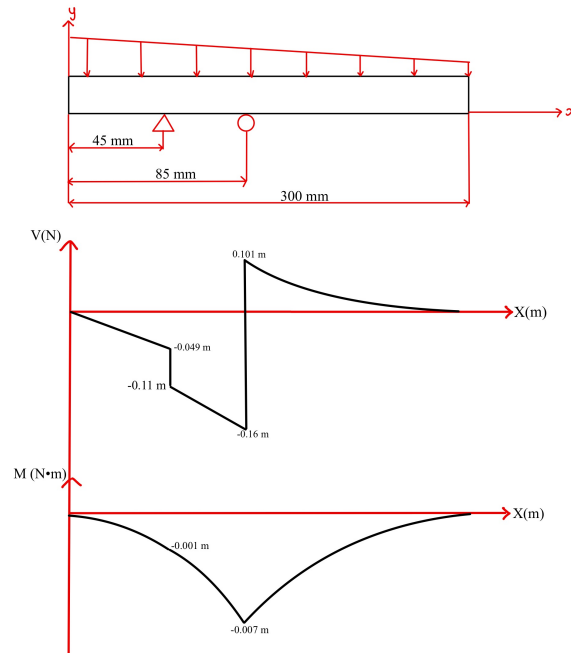
Propiedad	Valor	Unidades
Resistencia a la flexión	24	$\frac{N}{mm^2}$
Densidad	350	$\frac{kg}{m^3}$

Fuente: *British Standards Institution*

## Flexión del pedal

Conociendo las propiedades de la madera se calculó el esfuerzo máximo como una viga en flexión con 2 soportes que serían el eje y el resorte, sólomente considerando el caso de carga 3 como una carga distribuída. A continuación se observan los diagramas de corte y momento del pedal en la Figura 33, la sección donde se encuentra el momento máximo se tomó como la sección crítica y se calculó el esfuerzo normal por flexión en este punto.

Figura 33: DCL y diagrama de corte y momento correspondiente al pedal



La fatiga en maderas es un tema con poca investigación por lo que las teorías de falla para este material se encuentran aún en investigación. Para poder realizar un análisis lo más cercano a la fatiga se utilizó un modelo estático que toma en cuenta la aplicación de carga con distintas frecuencias de aplicación para calcular una resistencia a la flexión que se compara con el esfuerzo obtenido. La ecuación (8) indica los factores que se deben usar para el cálculo de resistencia a la flexión. Según el eurocódigo 5, las fuerzas dinámicas aplicadas al diseño se multiplican por 1.5, esto se aplica en la ecuación 10 y 14.

$$f_{m,y} = \frac{k_{mod} f_{m,k}}{\gamma_m} \quad (8)$$

donde,

$f_{m,y}$  = Resistencia a la flexión corregida

$k_{mod}$  = Factor de corrección según la frecuencia de la fuerzas (Se consideró instantánea)

$\gamma_m$  = Factor de corrección según la frecuencia de la fuerzas

$f_{m,k}$  = Resistencia a la flexión en condiciones normales

El cálculo de la resistencia corregida se detalla a continuación así como el cálculo del factor de seguridad correspondiente.

$$f_{m,y} = \frac{k_{mod}f_{m,k}}{\gamma_m} = \frac{0.9 * 24}{1.3} = 16.6MPa \quad (9)$$

$$n = \frac{f_{m,y}}{\sigma_{max}} = \frac{16.6MPa}{2.2309MPa * 1.5} = 4.96 \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que el factor de seguridad es bastante alto se consideró que la pieza soporta los esfuerzos.

**Aplastamiento del agujero del soporte**

El otro punto considerado como crítico fue el agujero del soporte del pedal que recibe una fuerza de aplastamiento por el eje que hace la unión. Para este caso se analizó el modo de falla por aplastamiento para madera siguiendo la normativa de la *British Standards Institution*

Este procedimiento requiere calcular una capacidad de carga para que luego sea comparada con los esfuerzos máximos.

$$f_{v,Rk} = 0.5 \frac{0.082(1 - 0.01d)\rho_k}{(1.35 + 0.015d)\sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2} \quad (11)$$

donde,

$f_{v,Rk}$  = Capacidad de carga por aplastamiento

$\rho_k$  = Densidad de la madera

$\alpha$ =ángulo entre la dirección de la fibra y la dirección de la carga

El cálculo de la capacidad se detalla a continuación así como el cálculo del esfuerzo máximo y el factor de seguridad correspondiente.

$$f_{v,Rk} = 0.5 \frac{0.082(1 - 0.01(0.008))350}{(1.35 + 0.015(0.008))\sin(90)^2 + \cos(90)^2} = 10.62MPa \quad (12)$$

$$\sigma_{max} = \frac{F}{dt} = \frac{65.65N}{2 * 0.008m * 0.0075m} = 0.55MPa \quad (13)$$

$$n = \frac{f_{v,Rk}}{\sigma_{max}} = \frac{10.62MPa}{0.55MPa * 1.5} = 12.87 \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que el factor de seguridad es bastante alto se consideró que la pieza soporta los esfuerzos.

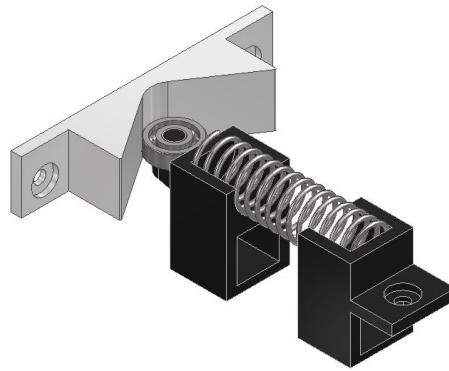
## 6.6. Sistema de retroalimentación de fuerza

### 6.6.1. Giro de la base

#### Diseño del mecanismo

El mecanismo consiste en dos correderas instaladas en el perfil central: una corredera móvil, conocida como seguidor, equipada con un cojinete para transmitir la fuerza sin fricción, y una corredera fija, llamada soporte del resorte. Ambas están conectadas mediante un resorte que se comprime a medida que una leva lineal, montada en el perfil frontal, rota junto con la base. Este mecanismo se observa en la Figura 34.

Figura 34: Sistema de retroalimentación de fuerza



Captura de pantalla reimpressa por cortesía de Autodesk Inventor.

#### Selección del resorte

La oferta de resortes personalizados o hechos a la medida es bastante limitada. Para evitar la necesidad de determinar experimentalmente la constante de rigidez de cada resorte, se optó por utilizar un resorte con ficha técnica disponible y con medidas convenientes para el diseño. Sin embargo, para alcanzar las fuerzas de reacción requeridas, se calculó la compresión necesaria de dicho resorte y se diseñó una leva que permitiera lograr dicha compresión con un desplazamiento angular de  $35^\circ$  en la base.

Figura 35: Ficha técnica del resorte

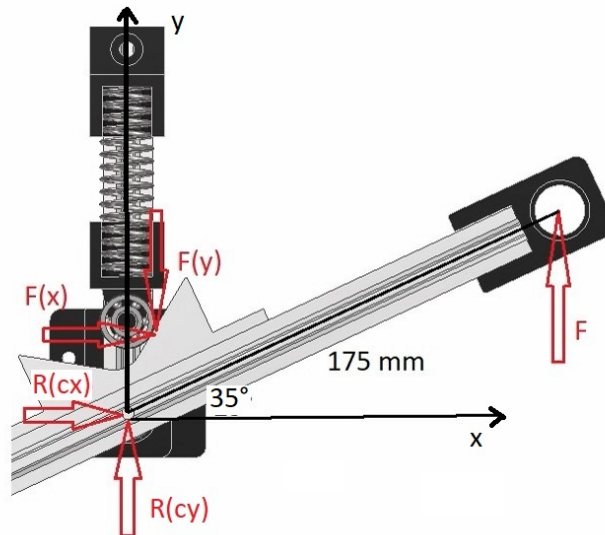


Fuente: La Casa del resorte

### Cálculo de la compresión del resorte

El diseño tiene como objetivo alcanzar un desplazamiento angular máximo de  $35^\circ$  en cada dirección al aplicar la fuerza de diseño. Al analizar el mecanismo y las fuerzas generadas, se identifican dos reacciones en el pivote del perfil y dos reacciones en el punto de contacto con el cojinete. El diagrama de cuerpo libre de la Figura 36 ilustra lo anteriormente explicado.

Figura 36: DCL del mecanismo de retroalimentación de fuerza



Captura de pantalla reimpressa por cortesía de Autodesk Inventor.

Para asegurar la validez del análisis de fatiga en la base, se procuró que las reacciones en el pivote coincidieran con las del caso de carga máxima considerado en dicho análisis. De esta manera, se conocen dos incógnitas y únicamente es necesario calcular las reacciones entre la leva y el cojinete.

Realizando sumatoria de fuerzas en  $y$ :

$$\sum F_y = 0 \quad (15)$$

$$F - F_y + R_y = 0 \quad (16)$$

$$F_y = R_y + F = 231.6N + 196.1N = 427.7N \quad (17)$$

Se calcula la compresión requerida del resorte para que genere la fuerza necesaria:

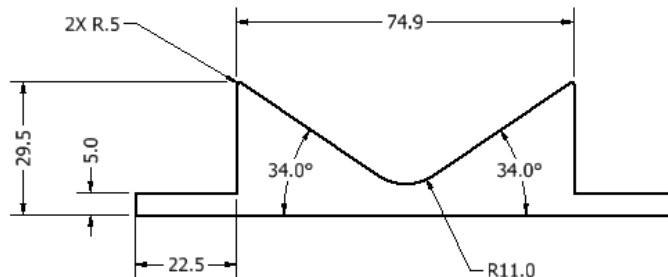
$$F_y = \Delta x * k \quad (18)$$

$$\Delta x = \frac{F_y}{k} = \frac{427.7N}{22N/mm} = 19.44mm \quad (19)$$

### Diseño de la leva

La leva tiene como objetivo aumentar progresivamente la compresión del resorte a medida que el mecanismo rota. Para mantener este incremento de compresión y, por lo tanto, de la fuerza de retroalimentación, se ha optado por una leva con perfil lineal. Esto garantiza una respuesta constante y uniforme desde el inicio del movimiento. La geometría de la misma se diseñó para lograr la compresión de 19.44 mm en el resorte cuando el mecanismo alcanza los 35° de desplazamiento. En la Figura 37 se presenta la geometría de la leva.

Figura 37: Geometría de la leva lineal



Captura de pantalla reimpressa por cortesía de Autodesk Inventor.

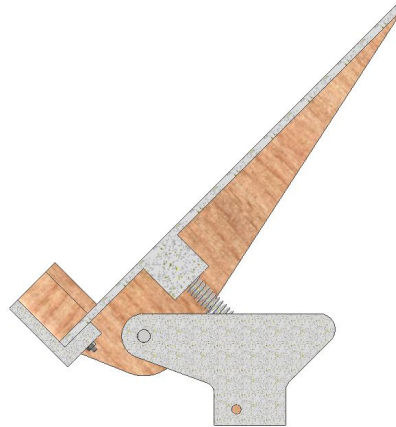
### 6.6.2. Giro de los pedales

#### Diseño del mecanismo

En el caso de los pedales, el mecanismo consiste únicamente en un resorte de compresión acoplado tanto al pedal como al soporte, mediante perforaciones estratégicas. Al rotar el

pedal, el resorte se comprime, generando una fuerza de reacción que mantiene los pedales en su posición y proporciona la sensación de frenado.

Figura 38: Sistema de retroalimentación de fuerza del pedal



Captura de pantalla reimpresa por cortesía de Autodesk Inventor.

### Selección del resorte

Para los pedales, se siguió un proceso similar: se seleccionó un resorte con especificaciones técnicas completas y dimensiones que se ajustaran adecuadamente a las del pedal. Posteriormente, se ajustó la posición de los orificios para asegurar que el momento de reacción fuera el esperado.

Figura 39: Ficha técnica del resorte del pedal



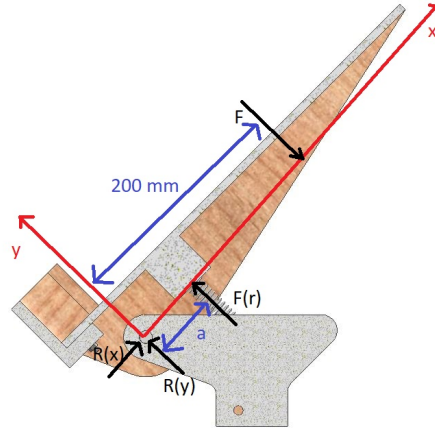
Captura de pantalla reimpresa por cortesía de Autodesk Inventor.

### Cálculo de la posición del resorte

Si analizamos el mecanismo de freno el pedal pivota sobre el eje y el resorte aplica un momento contrario al momento aplicado por el pie, considerando que la fuerza de diseño se aplique por completo al final de desplazamiento angular de 20° (justo antes del tope), se

calculó el brazo de palanca necesario para que se desarrolle la fuerza de freno considerada para el diseño. Cabe resaltar que se diseñó para que el resorte sufra poca compresión, esto con el objetivo de evitar la flexión del resorte durante el accionamiento.

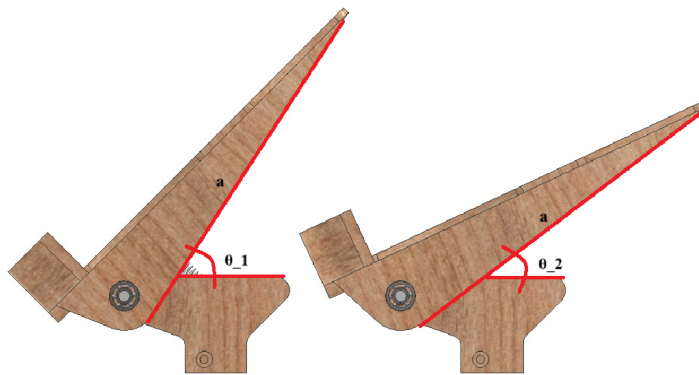
Figura 40: DCL sistema de retroalimentación de fuerza del pedal



Captura de pantalla reimpressa por cortesía de Autodesk Inventor.

Realizando sumatoria de momentos y despejando para “a”:

Figura 41: Cambio de ángulo



Captura de pantalla reimpressa por cortesía de Autodesk Inventor.

$$\sum M = 0 \tag{20}$$

$$F_R * a - F(200mm) = 0 \tag{21}$$

$$k\Delta x * a - F(200mm) = 0 \tag{22}$$

$$k * a\Theta * a - F(200mm) = 0 \quad (23)$$

$$a^2 * k * \Theta - F(200mm) = 0 \quad (24)$$

$$a = \sqrt{\frac{F * 200mm}{k * \Theta}} = \sqrt{\frac{71.5N * 200mm}{2 \frac{N}{mm} * 0.35rad}} = 50.02mm \quad (25)$$

La ubicación necesaria del resorte es a 50 mm del pivote, esto permite generar un momento equivalente al momento producido por la fuerza de diseño cuando se alcanza un desplazamiento de 20°.



Las figuras 42, 43 y 44 corresponden a los ensambles individuales que en conjunto conforman el módulo de pedales.

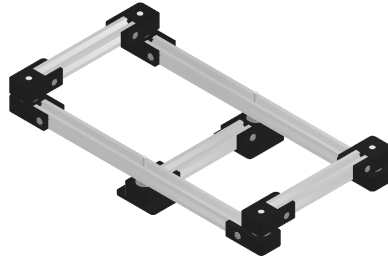
### 7.1. Diseño final

Figura 42: Ensamble de pedal



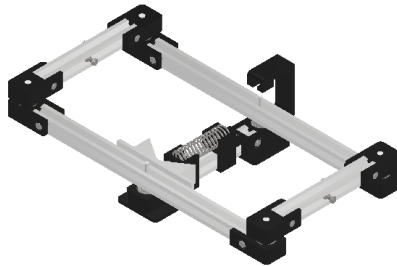
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk Inc.

Figura 43: Ensamble final de la base



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

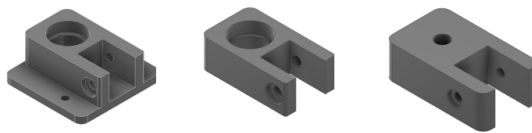
Figura 44: Ensamble de la base y *Force Feedback*



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

La Figura 45 corresponde a las piezas que permiten las uniones en las esquinas de la base.

Figura 45: Diseño de soportes de la base



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

La Figura 46 corresponde a las piezas que permiten las uniones entre los soportes de la base.

Figura 46: Diseño final de ejes



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

## 7.2. Costos del diseño

El Cuadro 22 muestra el costo unitario de cada material empleado en la construcción del diseño final.

Cuadro 22: Costos del diseño final

Cantidad	Descripción del producto	Precio Unitario	Total
24	Tuerca hexagonal M5 acero inoxidable	Q 0.39	Q 9.36
1	PF-2020T-2 Perfil de aluminio 2020 T-slot 2m largo	Q 100.00	Q 100.00
1	Resorte De Compresión 4 Plg - Century	Q 24.99	Q 24.99
2	Resorte de Compresión 10x12x70 mm	Q 25.00	Q 50.00
3	Potenciómetro de 100K OHMS	Q 5.00	Q 15.00
8	Cojinete 608ZZ NTN	Q 10.00	Q 80.00
1	Barra cilíndrica de acero CD 1018 3/8"	Q 10.00	Q 10.00
25	TOR-M520 Tornillo M5x20mm Cabeza Tipo Martillo Para perfil de aluminio	Q 1.50	Q 37.50
1	Madera de Pino de 2.5"x5"x4.69"	Q 100.00	Q 100.00
1	SUNLU PETG - 1. Kg / 1.75mm	Q 169.00	Q 169.00
<b>TOTAL</b>			<b>Q 595.85</b>

Fuente: Elaboración propia

### 7.3. Verificación de requisitos

Cuadro 23: Requisitos

Código	Descripción	
DM01	Para los cálculos, las cargas máximas aplicadas por los pies de una persona deben obtenerse experimentalmente.	Sí
DM02	El <i>Force Feedback</i> de los pedales de Cessna 172 debe ser de al menos 10 N.	Sí
DM03	Los pedales serán accesibles para personas que midan entre 1.58 m y 1.91 m de altura.	Sí
DM04	El sistema de pedales estará conformado por 2 pedales	Sí
DM05	Los materiales por utilizar para la construcción de los pedales deben tener una vida útil de al menos 6,000 horas.	Sí
DM06	El sistema de pedales no debe superar los 7 kg.	Sí
DM07	Se debe asegurar que las uniones esten libres de fricción de modo que la resistencia a la rotación del prototipo provenga enteramente del mecanismo de retoalimentación de fuerza.	Sí
DM08	Los pedales deben soportar una carga de al menos 100 kilogramos.	Sí
DM09	Los pedales utilizarán resortes de compresión con los cuales los pedales regresarán a su posición inicial.	Sí
DE01	Los cables que conectan los potenciómetros de la base y pedales a la interfaz no deben interferir con el desplazamiento de los pedales.	Sí
DE02	Cada pedal dispondrá de un sensor potenciométrico para registrar la actividad del freno y un potenciómetro más para la profundidad de giro.	Sí
DE03	Los sensores encargados de recibir información no deben ser impactados por los pedales.	Sí
SG01	El factor de seguridad mínimo contra la fatiga debe ser de 1.2	Sí
SG02	El factor de seguridad mínimo para las piezas diseñadas de madera debe ser 3.	Sí
SG03	Los pedales no tendrán partes punzantes o cortantes que puedan dañar al usuario.	Sí

Fuente: Elaboración propia

## 7.4. Resultados de cálculos

Los cuadros 24, 25, 29, 30 y 31 indican los resultados del análisis de fatiga según el caso correspondiente. Para más detalles sobre el análisis consultar la sección 5.5.3 (página 45).

### Perfil A

Cuadro 24: Resultados obtenidos para el perfil A

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	5.93	8.04	16.30
Esfuerzo Mínimo (MPa)	22.28	22.28	22.28
Esfuerzo Alternante (MPa)	-8.17	-7.12	-2.99
Esfuerzo Medio (MPa)	14.10	15.16	19.29
Sa (MPa)	45.58	39.70	16.24
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

### Perfil B

Cuadro 25: Resultados obtenidos para el perfil B

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	22.57	113.31	186.07
Esfuerzo Mínimo (MPa)	16.88	16.88	16.88
Esfuerzo Alternante (MPa)	2.85	48.22	84.59
Esfuerzo Medio (MPa)	19.73	65.09	101.47
Sa (MPa)	15.26	52.57	55.88
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

### Tornillos

Los cuadros 26, 27 y 28 indican los factores de seguridad obtenidos según el caso correspondiente. Para más detalles sobre el análisis consultar la sección 5.5.5 (página 49).

Cuadro 26: Factores de seguridad para el anclaje

Casos	Factor de seguridad
Cortante en el perno	15.92
Aplastamiento de los elementos	20.85
Aplastamiento de los pernos	103.61
Cortante del borde	5.21

Fuente: Elaboración propia

### Uniones pernadas en los soportes

Cuadro 27: Factores de seguridad para el soporte 3

Casos	Factor de seguridad
Cortante en el perno	1.71
Aplastamiento de los elementos	2.24
Aplastamiento de los pernos	11.12
Cortante del borde	2.24

Fuente: Elaboración propia

### Unión pernada al anclaje

Cuadro 28: Factores de seguridad para el anclaje

Casos	Factor de seguridad
Cortante en el perno	15.92
Aplastamiento de los elementos	20.85
Aplastamiento de los pernos	103.61
Cortante del borde	5.21

Fuente: Elaboración propia

### Ejes

Cuadro 29: Resultados obtenidos para el eje en el punto 2

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	106.23	177.38	291.76
Esfuerzo Mínimo (MPa)	79.40	79.40	79.40
Esfuerzo Alternante (MPa)	13.42	48.99	106.18
Esfuerzo Medio (MPa)	92.81	128.39	185.58
Sa (MPa)	52.01	100.61	120.83
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

### Soportes

Cuadro 30: Resultados obtenidos para las partes atornilladas al perfil

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	0.74	1.22	0.85
Esfuerzo Mínimo (MPa)	0.56	0.56	0.56
Esfuerzo Alternante (MPa)	0.09	0.33	0.15
Esfuerzo Medio (MPa)	0.65	0.89	0.70
Sa (MPa)	15.25	33.66	21.30
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 31: Resultados obtenidos para el agujero en el soporte

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Esfuerzo Máximo (MPa)	0.49	1.02	1.10
Esfuerzo Mínimo (MPa)	0.37	0.37	0.37
Esfuerzo Alternante (MPa)	0.06	0.33	0.37
Esfuerzo Medio (MPa)	0.43	0.69	0.73
Sa (MPa)	15.42	39.80	41.45
Vida	Infinita	Infinita	Infinita

Fuente: Elaboración propia

## 7.5. Resultados de pruebas

Los resultados de las pruebas se basan en un procedimiento descrito en detalle en el protocolo de pruebas. En resumen, estas pruebas permiten evaluar el comportamiento de los pedales al aplicar una fuerza controlada, simulando el esfuerzo físico utilizando una máquina de gimnasio. A partir de los datos obtenidos, se calculó el desplazamiento angular en la rotación de la base, así como el funcionamiento del freno en los pedales derecho e izquierdo. Los datos obtenidos se muestra en los cuadros 32, 33 y 34.

Cuadro 32: Resultados de la base

No. Prueba	Fuerza aplicada (N)	Resistió	Desplazamiento angular (°)
1	195	Sí	34.9
2	102	Sí	18.2
3	151	Sí	26.6
4	195	Sí	34.7
5	195	Sí	34.9
6	102	Sí	18.2
7	151	Sí	27.1
8	151	Sí	27.7
9	102	Sí	18.2

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 33: Resultados del freno en pedal derecho

No. Prueba	Fuerza aplicada (N)	Resistió	Desplazamiento angular (°)
1	13.3	Sí	19.6
2	66.7	Sí	19.4
3	13.3	Sí	3.9
4	66.7	Sí	19.8
5	66.7	Sí	19.6
6	22.2	Sí	3.9
7	13.3	Sí	3.8
8	22.2	Sí	6.3
9	22.2	Sí	6.3

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 34: Resultados del freno en pedal izquierdo

No. Prueba	Fuerza aplicada (N)	Resistió	Desplazamiento angular (°)
1	66.7	Sí	18.9
2	22.2	Sí	6.2
3	66.7	Sí	19.3
4	13.3	Sí	3.9
5	13.3	Sí	3.9
6	22.2	Sí	6.1
7	13.3	Sí	3.7
8	22.2	Sí	6.4
9	13.3	Sí	3.8

Fuente: Elaboración propia

---

## Discusión de resultados

---

En la sección de resultados, se puede observar que el mecanismo diseñado logró resistir con éxito todas las pruebas de fuerza aplicadas, cumpliendo con los requisitos de diseño. Este resultado confirma que el sistema es adecuado para soportar las exigencias operativas durante una simulación de vuelo. En particular, con fuerzas cercanas a las especificadas en el diseño, el desplazamiento de la base del mecanismo alcanzó un ángulo de giro de aproximadamente 35 grados, tal como se anticipaba en los cálculos previos. Comercialmente, no existe un diseño que sea cien por ciento idéntico al presentado en este trabajo, debido a que se buscaba utilizar materiales de bajo costo y peso, manteniendo la utilidad para la enseñanza de pilotos aviadores profesionales.

Uno de los mayores retos en el diseño fue idear el sistema de force feedback. Inicialmente, se propuso un soporte fijado al perfil B para sujetar uno de los extremos del resorte, pero este diseño fallaba, ya que al girar la base, el soporte se soltaba o deformaba el resorte. Para solucionar esto, se crearon dos correderas que fijaban el resorte al perfil central no móvil. No obstante, la fuerza del resorte al comprimirse levantaba las correderas, lo que llevó a un rediseño donde se incluyó una apertura en las correderas que permitía el paso del perfil, evitando que el resorte se levantara junto con los soportes. Este ajuste se muestra en la Figura 34 .

A pesar de que el PETG es un material que captura bien geometrías complejas y, según pruebas experimentales, puede soportar cargas, no cuenta con teorías de falla adecuadas, lo que impidió realizar un análisis de fatiga. Por esta razón, se optó por madera para la construcción de los pedales y sus soportes. La madera es más ligera y económica que el aluminio, lo que permitió mantenerse dentro del presupuesto de bajo costo, además de contar con teorías que permiten calcular los factores de seguridad adecuados.

Al aplicar fuerzas menores a las diseñadas, se observó que el desplazamiento de la base fue proporcionalmente menor al esperado, este comportamiento es consistente con las ex-

pectativas de diseño y demuestra la sensibilidad del sistema a las variaciones en las cargas. Sin embargo, se detectaron pequeñas variaciones en los resultados que, aunque mínimas, podrían estar relacionadas con holguras en los soportes o posibles deficiencias en el sistema de retroalimentación de fuerza. Estas deficiencias podrían deberse a la fricción entre el seguidor y el perfil central, lo que sugiere que una mejora en la alineación de los componentes podría reducir aún más estas variaciones.

Otro desafío fue la colocación de los potenciómetros, ya que no se deseaba perforar los perfiles o los pedales, lo que podría comprometer la rigidez de los materiales. En su lugar, se añadieron piezas adicionales. Para el potenciómetro que mide el giro de la base, se diseñó una pieza que lo sostiene al soporte C1 (Figura 20), uniendo la manecilla del potenciómetro al eje que sobresale del perfil B. Los potenciómetros que miden el frenado del pedal también se integraron mediante piezas adicionales adheridas con pegamento, las cuales sujetan la manecilla del potenciómetro al eje donde ocurre el movimiento.

Otro desafío surgió en el diseño de la leva, donde se encontró que si la apertura era demasiado amplia, el esfuerzo necesario para girar la base disminuía considerablemente. Para corregir esto, se realizó un análisis que relacionaba la compresión del resorte con el giro de la base, lo que llevó a diseñar una leva de perfil lineal con menor apertura. Los detalles de este análisis se pueden consultar en la sección 6.6.1 (página 50).

En el análisis de los perfiles A y B se obtuvieron buenos resultados bajo las fuerzas estimadas, con factores de seguridad adecuados que garantizan la durabilidad y estabilidad del sistema, esto se puede observar en el cuadro 24 y 25 de la sección 7.4. Los perfiles T-Slot, arrojaron un resultado de "vida infinita" para los esfuerzos considerados, lo que sugiere que en futuras iteraciones se podría utilizar un material de propiedades menores. No obstante, su geometría sigue siendo beneficiosa al facilitar la colocación de componentes sin necesidad de perforaciones, evitando concentraciones de esfuerzo.

Por otro lado, los soportes de la Figura 44 se diseñaron con agujeros de anclaje desfasados para eliminar un grado de libertad no deseado y evitar rotaciones accidentales. Para los pedales, se aplicó cinta antideslizante en la zona de apoyo del pie, creando fricción con la suela del zapato y mejorando el control sobre los pedales durante la simulación.

En cuanto a los costos, aunque el objetivo de invertir solo Q500 en la construcción del módulo de pedales no se alcanzó, ya que se superó el presupuesto en un 19.11 %, esto se debió al proceso iterativo, que requirió más material para pruebas y ajustes. No obstante, con el diseño ya validado, las futuras réplicas no consumirán tanto material, lo que permitirá reducir significativamente el costo de producción en futuras iteraciones. El costo real total sin el proceso de iteraciones habría sido de Q 481.59.

1. Se diseñó el sistema de pedales para un simulador de cabina de avión comercial el cual cumple con los requisitos que se establecieron en la sección 6.2, Cuadro 2 (página 25), excepto por el requisito CS01. Tiene una capacidad de resistir 196.1 N y el costo final fue de Q 595.85.
2. El sistema de pedales cuenta con una inclinación de 35°, con una capacidad de resistencia de 196.1 N. Además, fue diseñado para garantizar una "vida infinita" bajo las condiciones calculadas. Los materiales utilizados en su fabricación fueron adquiridos en el mercado local.
3. Se seleccionaron potenciómetros de 10K para la recopilación de datos de posición, velocidad y aceleración, debido a su bajo costo y facilidad de instalación.
4. Se fabricó un prototipo con las siguientes medidas 27.5x51.6x22 cm funcional y compatible con un módulo de Interfaz y un módulo de timón.
5. El proyecto cumplió con el objetivo de documentar el proceso de diseño y construcción, proporcionando un manual que detalla los pasos para ensamblar y utilizar el sistema de pedales. Esto facilita la replicación del modelo para futuras implementaciones en academias de aviación u otros centros de enseñanza.
6. El mecanismo demostró su capacidad para soportar la aplicación de diversas fuerzas, tanto en el movimiento de giro de la base como en el frenado individual de cada pedal.
7. El sistema de *force feedback*, compuesto por dos correderas (una móvil y una fija), un seguidor, y una leva con perfil lineal, junto con un resorte de constante de rigidez 22 N/mm, demostró ser un mecanismo eficiente y funcional. A través de cálculos precisos, se logró alcanzar tanto la inclinación deseada como la fuerza de reacción requerida, cumpliendo con los objetivos de diseño de manera efectiva.
8. Diseñar el sistema de pedales con un enfoque modular facilitó su ensamblaje y ajuste, y permitió una mayor flexibilidad para futuras modificaciones o ajustes.



1. Al finalizar la realización del trabajo en su totalidad, estas son potenciales mejoras técnicas:
  - Se recomienda instalar carriles debajo de cada pedal para asegurar la estabilidad de la base y prevenir posibles desequilibrios.
  - Se recomienda fabricar los soportes en aluminio, ya que el material PETG genera una holgura excesiva entre el cojinete y el soporte, así como entre el eje y el soporte.
  - Se recomienda alinear con precisión la manija del potenciómetro con el eje, a fin de evitar esfuerzos de corte y garantizar una lectura precisa del sensor.
  - Se sugiere implementar un sistema de amortiguación que facilite el retorno suave de los pedales a su posición inicial.
  - Se sugiere implementar un sistema de retroalimentación de fuerza que ajuste la resistencia para simular diferentes condiciones de vuelo.
  - Revisar el estado de los cojinetes, ya que un juego excesivo entre las bolas y el anillo puede generar un desbalance en el mecanismo al apoyar los pies y al girar la base.
2. Considerar las limitantes del tamaño de los componentes que se fabrican en herramientas como la cortadora CNC.
3. Se recomienda integrarse sensores más avanzados como giroscopios o acelerómetros para medir con mayor precisión las fuerzas y movimientos aplicados en los pedales. Esto permitirá capturar datos más detallados y mejorar la respuesta del simulador.
4. Se recomienda llevar el diseño a academias de aviación o a pilotos profesionales para obtener retroalimentación directa sobre la sensación y respuesta de los pedales, y hacer ajustes basados en esos comentarios.



- A., Z. (2023). *Rudder pedals for flight sims* (inf. téc.). BBA.
- Abuized, O. A., & Essameldin, A. (2022). *Motion Cueing Algorithm for Flight Simulator: Interfacing and Pilot Controls Implementation*.
- ANAC. (2023). *Aerodinámica Básica* (inf. téc.). Administración Nacional de Aviación Civil.
- Autari, I. (2021). 25 Simuladores de vuelo TOP (Profesionales y para PC). *IAT*.
- Aviador, P. (2023). Piloto Aviador.
- Aviation, T. (2016). *Cessna 172 Information Manual* (inf. téc.). CESSNA AIRCRAFT COMPANY.
- AVIATIONGROUP. (2020). Simuladores de vuelo para uso recreativo y profesional.
- Cameron, B. (2016). Development and Implementation of Cost-effective Flight Simulator Technologies. *International Conference on Control, Dynamic Systems, and Robotics*.
- Chaparro, C. L. P. (2019). *Diseño y simulación del sistema de control de una plataforma de movimiento para simuladores de vuelo* (inf. téc.). No especificado. Santiago de Cali.
- Cheno, S. O. (2015). *Análisis y Diseño de un Vehículo Aéreo con Despegue Vertical* (Informe). Nuevo León.
- de Escuela de Aviación, H. (2020). Historia de Escuela de Aviación.
- DGAC. (2023). *Escuelas de instrucción aeronáutica* (inf. téc.). Dirección General de Aeronáutica Civil.
- FAA. (2021). *Basic Flight Maneuvers, Airplane Flying Handbook* (inf. téc.). Federal Aviation Administration.
- Fenton, C. (2018). Rudders – a new take on Force-Feedback. *Heritage Flight Simulator*.
- Hughes, R. A. (2022). EuroNews. *Revista*. <https://es.euronews.com/viajes/2022/11/30/las-aerolineas-dicen-que-es-seguro-que-los-aviones-vuelen-con-un-solo-piloto-en-cabina#:~:text=30%2F11%2F2022-,Los%20vuelos%20comerciales%20suelen%20tener%20dos%20pilotos%20en%20la%20cabina,pasajeros%20en%20lugar%20>
- Johnston, M. (2018). The Basics of the Cockpit. *California Aeronautical University*.
- Kelvin Valentino, K. C., & Joelianto, E. (2017). Virtual Reality Flight Simulator. *INTERNETWORKING INDONESIA JOURNAL*.
- Lavilla, C. (2020). Cómo frenan los aviones. *Turama*.

- Lima, L. (2022). A qué se debe la grave escasez de pilotos que afecta a las aerolíneas de todo el mundo. *BBC News Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-62273311#:~:text=%22Ciertamente%20%20la%20causa%20de%20la,problema%20%22a%20corto%20plazo%22>.
- Limache, A. C. (2010). Diseño de un Moderno Simulador de Vuelo en Tiempo Real. *Mecanica Computacional*, 12.
- LogiTech. (2023). Logitech. [https://www.amazon.com/-/es/Logitech-Pedales-tim-C3-B3n-vuelo-profesional-dp-B07R21FJD8/dp/B07R21FJD8/ref=dp\\_ob\\_image\\_ce](https://www.amazon.com/-/es/Logitech-Pedales-tim-C3-B3n-vuelo-profesional-dp-B07R21FJD8/dp/B07R21FJD8/ref=dp_ob_image_ce)
- Martín, A. S. H. (2013). Desarrollo de simulador de vuelo basado en herramientas Open Source. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/15438?locale-attribute=en>
- Ming, S. (2023). Design for Brake Device of Rudder Pedal Based on Torsion Bar. *Chinese Society of Aeronautics and Astronautics*.
- Morales, R. (2022). Alfa Beta. <https://www.mundodeportivo.com/alfabeta/listas/mejores-simuladores-vuelo#:~:text=Microsoft%20Flight%20Simulator,-Es%20un%20simulador&text=El%20juego%20de%20simulaci%C3%B3n%20de,del%20vuelo%20y%20sus%20controles>
- OACI. (2020). Throttle Lever / Power Lever. *Skybrary*.
- Rico, L. C. V. (2018). Simuladores de Vuelo: Una Revisión. *Ciencia y Poder Aéreo*.
- Rodriguez, P. (2019). ¿Cuántas horas necesito para ser piloto comercial o de línea aérea? <https://ideonline.aero/cuantas-horas-necesito-para-ser-piloto-comercial-o-de-linea-aerea-e/#:~:text=200%20horas%20de%20vuelo%20en,20%20horas%20de%20simulador>
- Rouse, M. (2015). Techopedia. *Flight Simulator*.
- Roy, R. (2022). *World Biggest International Flight Simulation*. Lelystad.
- Pedal Force Measurement Sensor (PFMS)*. (2023).
- Sakurai, S. (1991). *Modular rudder pedal and brake control assembly for aircraft* (inf. téc.). Boeing Co.
- Scheibe, T. (2019). Flight Sim Rudder Pedals. *Flight Simulator*.
- Sobral, E. G. (2023). *Introducción al estudio de áreas genéricas de la aviación*. Aerotraining.
- Srtickland, J. (2023). How Virtual Reality Military Applications Work. *Flight Simulator*.
- Strand, A. B., & Simon. (2019). Fully automated rudder pedal. *Division of product development / Department of design sciences*.
- Training, A. (2023). Training, Aereo. *Flight sim rudder pedals – ruddo+*. (2023).
- Wilshire Law Firm. (2024). Accidentes Aéreos [Consultado el 11 de septiembre de 2024]. <https://www.wilshirelawfirm.com/accidentes-aereos>
- Zachari, A. (2021). Flight Sim Rudder Pedals Explained (Best Rudder Pedals). *Built By AZ*.

## **12.1. Protocolo de pruebas**

El presente anexo detalla el protocolo de pruebas aplicado al sistema de pedales diseñado para el simulador de vuelo. El objetivo de este protocolo es evaluar el desempeño y la resistencia del sistema bajo condiciones controladas, replicando las fuerzas y movimientos que se esperan durante su uso en simulaciones de vuelo.

## **12.2. Manual de fabricación y ensamble**

En este manual se presentan las instrucciones detalladas sobre los componentes que forman el sistema, las herramientas necesarias y los procedimientos de ensamblaje.

## **12.3. Planos de construcción**

Los siguientes planos presentan el diseño técnico detallado del sistema de pedales para el simulador de vuelo desarrollado en este proyecto. Cada uno de los planos incluye las dimensiones, componentes y ensamblajes necesarios para la fabricación y montaje del sistema.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



## **Protocolo de pruebas**

Diseño y fabricación de pedales para un simulador de avión  
comercial para uso didáctico en Guatemala

Elaborado por:  
Ana Lucía Pérez 20452

Departamento de Ingeniería Mecánica

Guatemala, abril de 2024

## 1. Introducción

El objetivo principal de las pruebas del prototipo de pedales del simulador de avión comercial es verificar los siguientes aspectos: funcionamiento, donde se busca ver el movimiento de los pedales, las rotaciones de los rodamientos, el acoplamiento entre las partes, ver si los componentes regresan a su posición al dejarlos de usar, y ergonomía, donde una persona ajena al proyecto utilice el prototipo y brinde retroalimentación de la sensación física de operar el sistema de pedales. Con base en los resultados obtenidos en las pruebas será necesario realizar cambios en el diseño para optimizar su funcionamiento y rendimiento. Además, se buscarán alternativas si en caso los pedales no cumplen con los requisitos establecidos, como buscar pedales alternativos en el mercado o se reconsiderará el diseño y la fabricación de nuevos pedales.

Es importante destacar que el diseño y la fabricación de los pedales deben considerar las características físicas y ergonómicas de los usuarios guatemaltecos, asegurando una experiencia de aprendizaje cómoda y efectiva. Además, los pedales deben ser resistentes y duraderos para soportar el uso frecuente en entornos educativos.

## 2. Especificaciones técnicas

- Dimensiones del módulo:
  - Altura: 27.5 cm
  - Ancho: 51.6 cm
  - Profundidad: 22 cm
  
- Materiales que se utilizaron para la construcción del prototipo:
  - Perfiles V slot de aluminio
  - Ejes de aluminio
  - Soportes de PETG
  - Pedales de madera (pino)
  
- Peso: 13 libras
  
- Capacidad máxima de carga en pedales: 196.1 Newtons

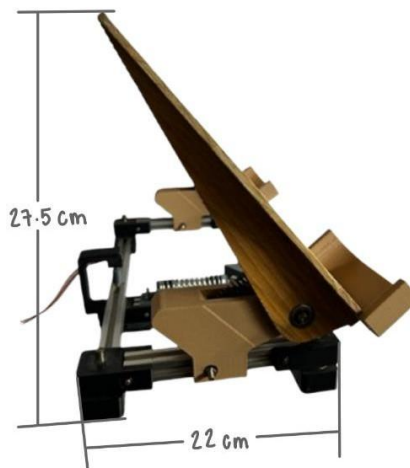


Figura 1. Medida de altura y profundidad



Figura 2. Medida de ancho

### 3. Procedimiento de pruebas y mediciones

La primera prueba consiste en una prueba de funcionamiento general del módulo de pedales que tiene como objetivo verificar el rango de movimiento de todas las partes móviles.

#### Verificaciones técnicas por realizar:

1. Colocar los pies sobre los pedales.
2. Para accionar los pedales, presione únicamente el pedal derecho (1) para rotar la base (2) y compruebe que la rotación de los cojinetes (3) sea libre.
3. Deje de presionar el pedal derecho para regresar los pedales a su posición original. Verifique que el resorte (4) regrese a su posición rápidamente.
4. Presione únicamente el pedal izquierdo (5) para rotar la base y compruebe que la rotación de los cojinetes (3) sea libre.
5. Deje de presionar el pedal izquierdo para regresar los pedales a su posición original.
6. Para accionar los frenos (6) presione ambos pies simultáneamente, con los pies presionados, asegúrese que hay rotación libre en los cojinetes (7) que permiten la acción de frenar.
7. Verifique que todos los tornillos (8) en la base estén apretados
8. anclaje
9. Los pedales de madera y los soportes (9) (de PETG) no deben tener grietas o agujeros que no sean parte del diseño.

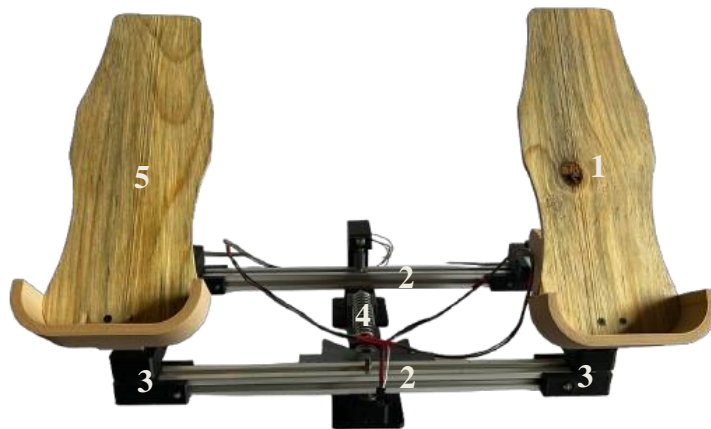


Figura 3. Indicaciones técnicas, vista delantera.

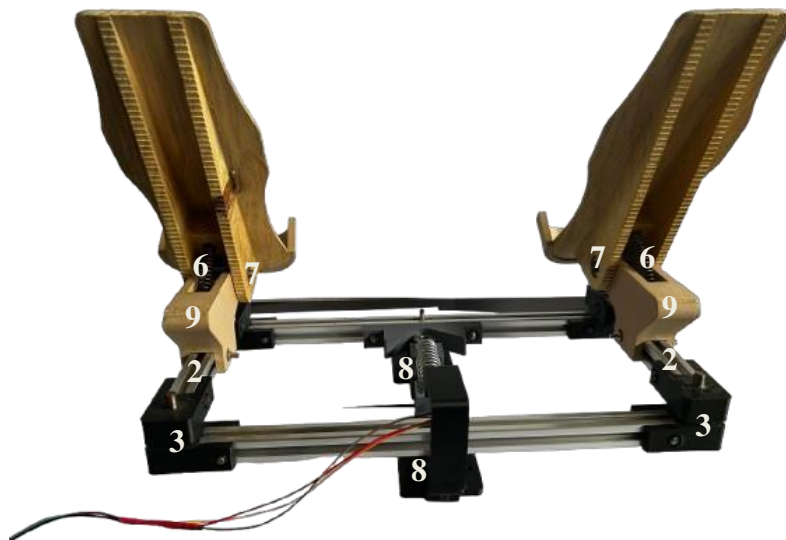


Figura 4. Indicaciones técnicas, vista trasera.

La segunda prueba detalla el procedimiento necesario para explicar el funcionamiento de los componentes del módulo, de manera que el usuario pueda comprender claramente la función específica de cada uno de los elementos descritos a continuación.

Procedimiento de operación:

1. Es necesario encender la interfaz a la cual estará conectada el módulo.
2. Se debe colocar un pie en cada pedal.
3. Para rotar la base se presiona el pedal correspondiente al lado al que se desee rotar.
4. Para accionar los frenos se presiona la punta del pedal únicamente. Dejando los talones fijos al pedal.
5. Para que los pedales regresen a su posición es necesario dejar de empujar el pedal o quitar ambos pies de los pedales.

Para comprobar el buen funcionamiento del módulo, se recomienda llevar a cabo la siguiente serie de pasos con 5 personas o más que puedan ejercer al menos tres distintos valores de fuerza al mecanismo como se explica a continuación.

Mediciones que realizar:

1. Comprobar las distintas fuerzas de freno que cada persona aplique no perjudicará el funcionamiento de los componentes como el eje o los resortes.
2. Realice desplazamientos tanto en los giros como en cada freno para comprobar la lectura y el correcto funcionamiento de los tres sensores instalados. Asegúrese de que los potenciómetros estén operando adecuadamente.
3. Compruebe visualmente que los pedales regresen.
4. Si es posible, repetir las pruebas con 5 personas o más que sean capaces de ejercer al menos tres valores de fuerzas distintos al mecanismo, para la verificación del funcionamiento.

A continuación, se describen los pasos necesarios para llevar a cabo las pruebas de desplazamiento y fuerza ejercida en los pedales, con el objetivo de obtener mediciones precisas tanto del movimiento lineal como del angular. Estas pruebas permitirán evaluar el comportamiento de los pedales bajo la aplicación de una fuerza controlada, replicando el esfuerzo físico en una máquina de gimnasio. Los datos obtenidos serán utilizados para calcular el desplazamiento angular mediante trigonometría, lo que proporcionará una visión integral del rendimiento de los pedales en diferentes condiciones de uso.

Procedimiento para la obtención de resultados de las pruebas:

1. El individuo debe replicar el movimiento que realizaría al accionar los pedales en una máquina de gimnasio. Comenzará con el peso mínimo y aumentará progresivamente hasta alcanzar un peso que pueda manejar sin realizar un sobreesfuerzo significativo. Se debe registrar el último valor del peso alcanzado.
2. A continuación, el mismo individuo ejercerá fuerza sobre el pedal derecho, igualando la fuerza aplicada en el paso anterior. Mantendrá el pedal presionado mientras se mide el desplazamiento desde la posición inicial en la base hasta la posición final con la fuerza ejercida. Este procedimiento se debe repetir con el pedal izquierdo.
3. Luego, el individuo aplicará la misma fuerza que en la máquina de gimnasio para accionar el freno del pedal. Comenzará con el pedal derecho, midiendo el desplazamiento del resorte desde la posición original del pedal hasta la posición alcanzada, es decir, el cambio de altura del pedal. El mismo procedimiento se debe realizar con el pedal izquierdo.
4. Los resultados obtenidos de las pruebas anteriores serán lineales. A partir de estos, y aplicando principios de trigonometría, se calculará el desplazamiento angular, tanto para el movimiento de la base como para el freno de los pedales.
5. La ecuación por utilizar para obtener el desplazamiento angular de la base es:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{y}{175}\right)$$

6. La ecuación por utilizar para obtener el desplazamiento angular del freno del pedal es:

$$\theta = 45^\circ - \left(\sin^{-1}\left(\frac{v}{300 \text{ mm}}\right)\right)$$

#### 4. Herramientas necesarias

No.	Tipo	Descripción
1	Ratch, copa de 10 mm	Se utiliza para apretar los tornillos de la base.
2	Ratch copa de 8 mm	Se utiliza para apretar las tuercas.
3	Prensa	Se utiliza para apretar los rodamientos a los ejes.

#### 5. Identificación de peligros

Identificación de peligros				
No.	Tipo	Descripción	Control(es)	Solución
1	Ergonómico	Un diseño inadecuado de los pedales puede generar incomodidad, fatiga o incluso lesiones en los pies y piernas del usuario, especialmente durante vuelos prolongados.	Eliminación	Buscar una posición cómoda de instalación de los pedales. Se sugiere cambiar el calzado de la persona para ver si las condiciones mejoran.
2	Físico	Si el resorte que representa la fuerza de retroalimentación se regresa de forma brusca podría lastimar el pie del usuario.	Eliminación	Los pedales regresan a una posición inicial que está restringida para evitar un movimiento fuera del rango esperado.
3	Físico	Los pedales pueden sufrir fallos mecánicos como roturas, desgaste excesivo o atascamiento, lo que podría afectar la	Eliminación	Las piezas estarán debidamente calculadas para tener factores de seguridad. Las piezas están

No.	Tipo	Descripción	Control(es)	Solución
		capacidad del usuario en accionar el mecanismo		debidamente lubricadas para evitar atascamientos.
4	Físico	Sin una superficie antideslizante en cada pedal el usuario podría resbalar el pie al aplicarle fuerza.	Eliminación	Los pedales tendrán un material antideslizante que evite el riesgo de deslizamiento de los pies.

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

Equipo de protección personal (EPP) y de mitigación		
Cant.	Descripción	Verificado
1	Calzado cerrado, de preferencia zapatos con suela antideslizante.	

## 7. Documentación requerida previo a iniciar una prueba

La documentación listada en esta sección debe estar disponible en formato impreso en todo momento durante la realización de toda prueba y las verificaciones y firmas requeridas se deberán llenar a mano previo al inicio de dichas pruebas.

Es importante hacer notar que esta documentación tiene validez solo durante el día en que se llena, por lo que si la prueba toma más de un día entonces la misma deberá volver a llenarse ya que implica el reconocimiento y compromiso de cumplimiento de los procedimientos de seguridad que dicha documentación contiene. Esto deberá ser realizado por todas las personas que participen en las pruebas sin excepción; y a la vez implica que ninguna persona que no firme los compromisos podrá participar de dichas pruebas.

Esta documentación incluye:

1. Compromiso de conocimiento y cumplimiento del protocolo de seguridad. Se llena un documento con formato de lista para todos los participantes. (Anexo 1)
2. Reconocimiento de estado y disponibilidad para poder realizar la prueba. Se llena una copia por cada participante. (Anexo 2)
3. Verificación de EPP. Se llena una copia por cada participante. (Anexo 3)
4. Verificación de equipo de mitigación necesario. Se llena una copia por parte del estudiante a cargo y la misma debe contar con el visto bueno de todos los participantes. (Anexo 4)
5. Procedimiento de pruebas y mediciones de la sección 3 del presente protocolo. Si al momento de la prueba se debiera realizar algún cambio en el procedimiento, entonces esto deberá ser comunicado a todos los participantes quienes deberán

firmar con su visto bueno el reverso de la copia impresa donde se anotará a mano el cambio efectuado.

6. Protocolo de emergencia presentando todos los números telefónicos de emergencia. Se llena una copia con formato de lista para todos los participantes. (Anexo 5)
7. Observaciones y comentarios de las pruebas. (Anexo 6)

## **8. Protocolo e información para casos de emergencia**

El mismo se detalla en el anexo 5 y tiene por finalidad que todos los participantes de las pruebas a realizar tengan claridad de la manera en que deben actuar ante la ocurrencia de un incidente

## **9. Resultados y observaciones**

El anexo 6 será utilizado para registrar los resultados de las pruebas, así como para anotar cualquier observación o comentario sobre los mismos por parte de los participantes.


# 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 5, 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 2 y 3 son verídicos y que he tomado el tiempo de verificar la información contenida en el anexo 4 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
20452	Ana lucía Pérez Pérez	

Guatemala, 8 de agosto de 2024

## ANEXO 2

### 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.

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 indispuesto 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. (habilitado/inhabilitado)

Fecha: 8/08/2024

Nombre: Ana Lucía Pérez Pérez Firma: 

#### Contacto para caso de emergencia:

Nombre: Jorge Pérez  
3540 7931

Número(s) telefónico(s):

Correo electrónico: leonelquate@yahoo.com.mx

## ANEXO 3

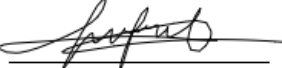
### VERIFICACIÓN DE EPP

Instrucciones:

Marque con una X la casilla de verificación para cada uno de los equipos listados. La necesidad del uso 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.

Equipo de protección personal (EPP) y de mitigación		
Cant.	Descripción	Verificado
1	Calzado cerrado, de preferencia zapatos con suela antideslizante.	

Fecha: 8/08/2024

Nombre: Ana lucía Pérez Pérez Firma: 

## ANEXO 5

### PROTOCOLO DE EMERGENCIA

#### 1. Acciones a tomar ante un accidente que provoque daño físico a cualquiera de los participantes:

- 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 importantes a tener en cuenta en caso de emergencia.

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

Si las pruebas se están realizando dentro de las instalaciones de la universidad 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.

## ANEXO 6

### RESULTADOS Y OBSERVACIONES

Desplazamiento de la base

No. Prueba	Fuerza aplicada (N)	Resistió SÍ / NO	Desplazamiento angular (°)
1.	195	SÍ	34.9
2.	102	SÍ	18.2
3.	151	SÍ	26.6
4.	195	SÍ	39.7
5.	195	SÍ	34.9
6.	102	SÍ	18.2
7.	151	SÍ	27.1
8.	151	SÍ	27.7
9.	102	SÍ	18.2
10.	102	SÍ	18.3

Desplazamiento angular freno pedal derecho

No. Prueba	Fuerza aplicada (N)	Resistió SÍ / NO	Desplazamiento angular (°)
1.	13.3	SÍ	19.6
2.	66.7	SÍ	19.4
3.	13.3	SÍ	3.9
4.	66.7	SÍ	19.8
5.	66.7	SÍ	19.6
6.	22.2	SÍ	3.9
7.	13.3	SÍ	3.8
8.	22.2	SÍ	4.3
9.	22.2	SÍ	6.3
10.	13.3	SÍ	3.9

Desplazamiento angular freno pedal izquierdo

No. Prueba	Fuerza aplicada	Resistió SÍ / NO	Desplazamiento angular (°)
1.	66.7	SÍ	18.9
2.	22.2	SÍ	6.2
3.	66.7	SÍ	19.3
4.	13.3	SÍ	3.9
5.	13.3	SÍ	3.9
6.	22.2	SÍ	6.1
7.	13.3	SÍ	3.7
8.	22.2	SÍ	6.4

9.	13.3	Si	3.8
10.	22.2	Si	6.1

Diseño y fabricación de pedales para un simulador de avión  
comercial para uso didáctico en Guatemala

## Manual de construcción

### Introducción

El presente manual detalla los pasos a seguir para el ensamble del prototipo de sistema de pedales de avión, tome en cuenta que las piezas deben ser previamente compradas o fabricadas según sea el caso. Además, se recomienda utilizar los planos del modelo como material complementario para el proceso de fabricación y ensamblaje.

### Listado de piezas

<b>Cantidad</b>	<b>Pieza</b>	<b>Código</b>	<b>Material/descripción</b>
11	Cojinete 608zz NTN	CJ	
2	Eje central		Acero 1018 CD
2	Soporte central		Impresión 3D de PETG
4	Soporte lateral		Impresión 3D de PETG
4	Soporte lateral complementario		Impresión 3D de PETG
4	Eje lateral		Acero 1018 CD
2	Perfil horizontal	PH	Perfil T-slot 2020
3	Perfil transversal	PT	Perfil T-slot 2020
2	Soporte pedal	SP	Madera de pino maquinada
2	Talón pedal	TP	PETG
2	Pedal	P	Madera de pino maquinada
2	Eje Pedal	JP	Acero 1018 CD
4	Anillo de retención 8 mm	AR	
1	Resorte pedal	RS	Resorte
1	Seguidor	SG	Impresión 3D de PETG
1	Soporte resorte	SR	Impresión 3D de PETG
1	Resorte retroalimentación de fuerza		Resorte
1	Leva		Aluminio 6061
24	Tornillo para T-slot M5x15		

24	Tuerca M5		
4	Tornillo M3x20 avellanado allen		
4	Tuerca M3		

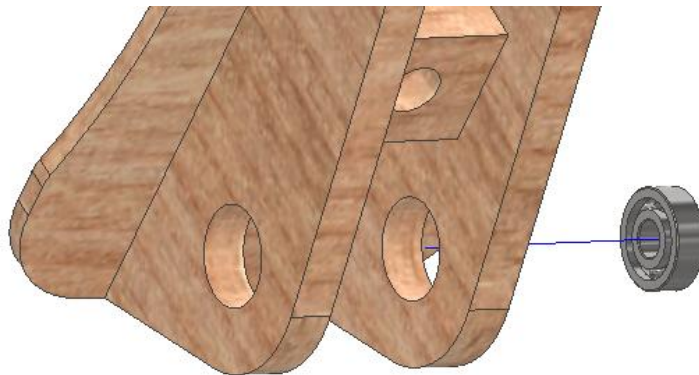
Listado de materiales y herramientas

Cantidad	Herramienta/Material
1	Llave 8 mm
1	Copa 8 mm
1	Rachet 1/4
1	Pinzas para anillos de retención

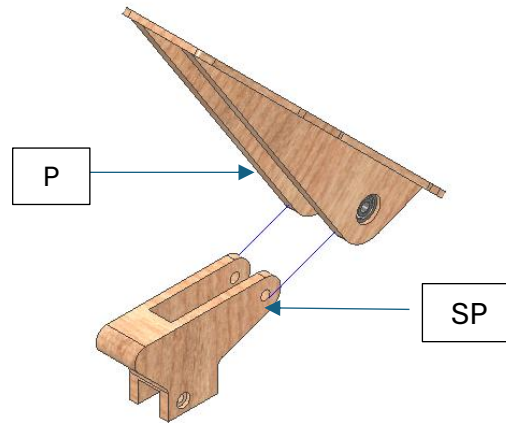
### Procedimiento de ensamblaje

#### Ensamblaje de los pedales

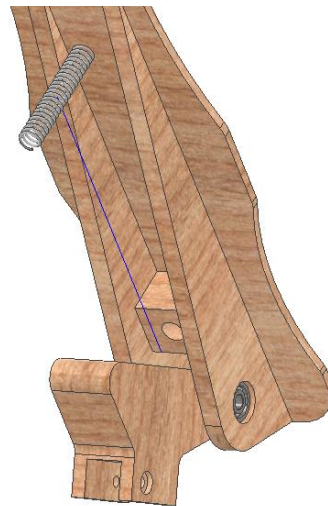
1. Inserte a presión un cojinete CJ en uno de los orificios del pedal PE, asegurándose de que quede alineado con la superficie interna.



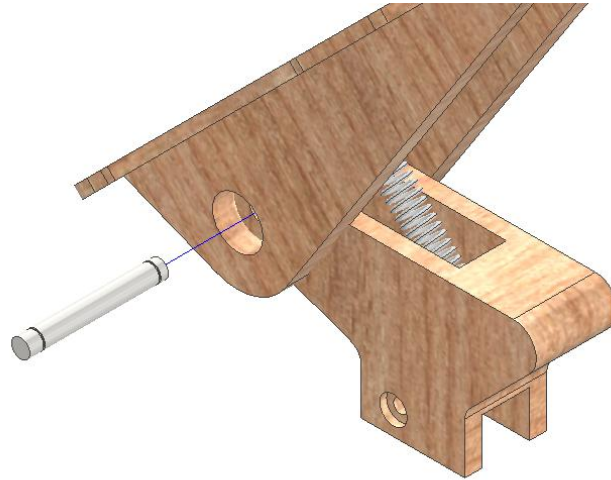
2. Coloque el pedal PE y asegúrese que las pestañas del soporte SP queden dentro de las pestañas de PE, alinee los agujeros de SP con los agujeros del cojinete CJ.



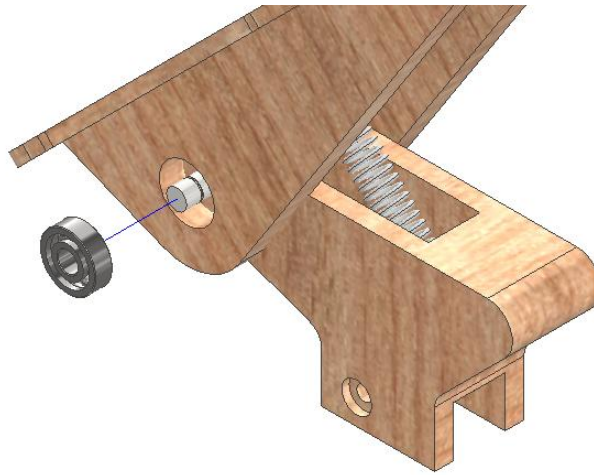
3. Ubique el resorte RS para el pedal e insértelo en los orificios correspondientes de los componentes PE y SP.



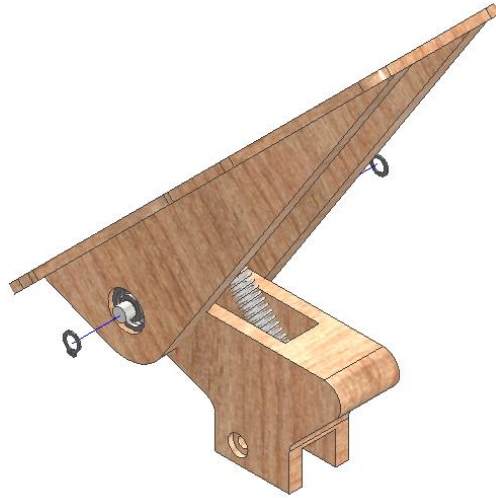
4. Inserte el eje del pedal JP por el orificio del pedal opuesto al cojinete CJ, deslícelo hasta que la ranura sea visible en el extremo opuesto.



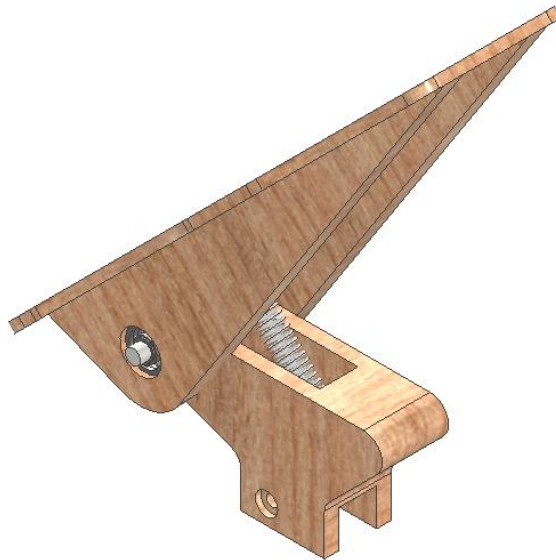
5. Introduzca un cojinete CJ del lado faltante alineándolo con la cara interna nuevamente.



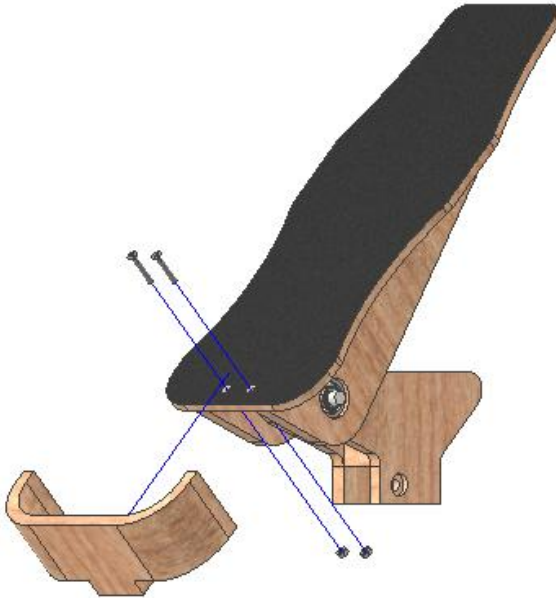
6. Fije el eje CJ con 2 anillos de retención AR (Uno por lado).



7. Revise que el mecanismo rote sin ningún problema y el resorte oponga una resistencia al aplicar fuerza al pedal.



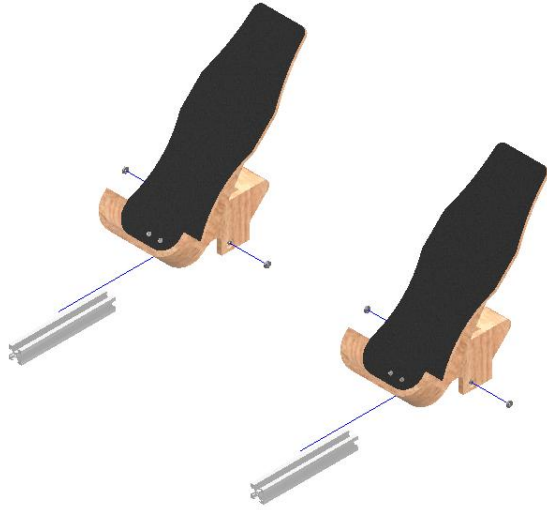
8. Ensamble el talón de pedal como se muestra en la siguiente imagen, y utilizando 2 tornillos M3 y 2 tuercas M3 fijarlo en su posición como se muestra en la imagen.



9. Repita el proceso para ensamblar el otro pedal.

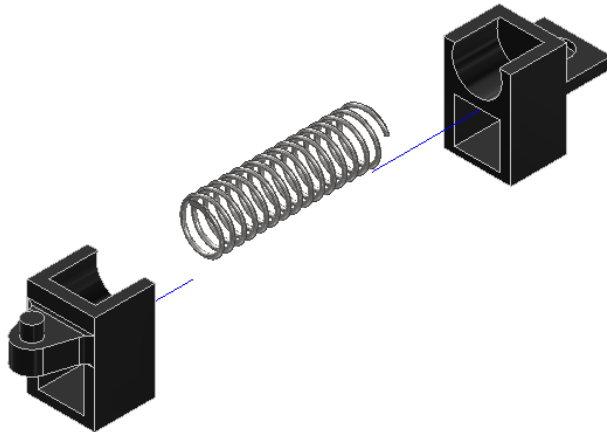


10. Deslice el perfil transversal debajo del soporte del pedal SP y ensámblelos utilizando 4 tornillos T (2 por pedal) junto con las tuercas M5 como se muestra en la imagen.

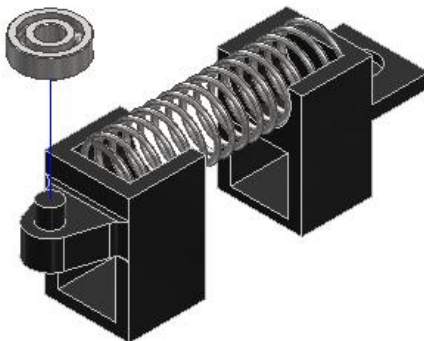


#### Ensamblaje de la base y del sistema de retroalimentación de fuerza

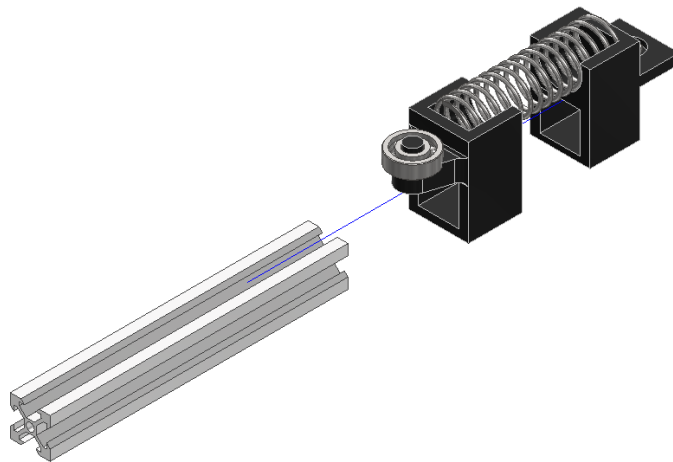
1. Ensamble el resorte de retroalimentación de fuerza al soporte SR y al seguidor SG, como se muestra en la imagen.



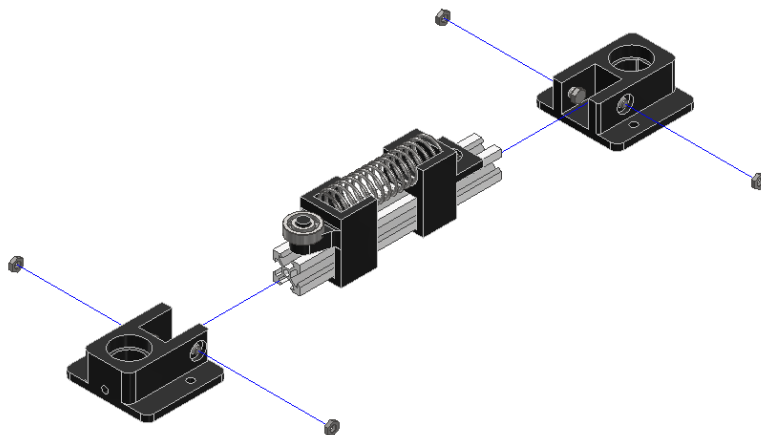
2. Ensamble a presión un cojinete CJ en el seguidor.



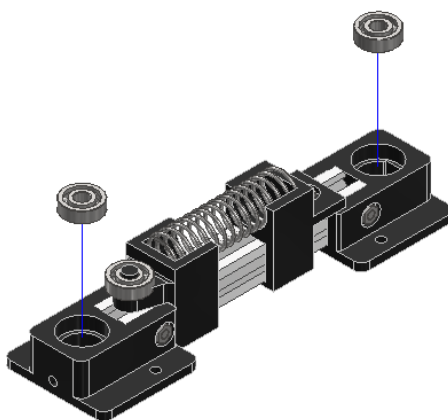
3. Ensamble el conjunto al perfil central utilizando un tornillo T.



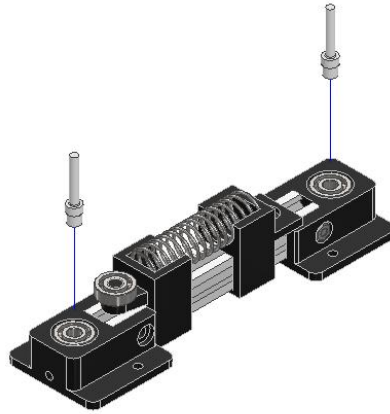
- Utilizando 4 tornillos T, ensamble los 2 soportes centrales al perfil central y fíjelos utilizando 4 tuercas M5.



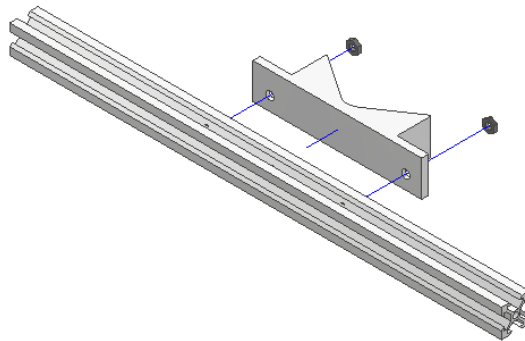
- Ensamble a presión 2 cojinetes CJ a los soportes centrales en las cavidades correspondientes de los soportes centrales.



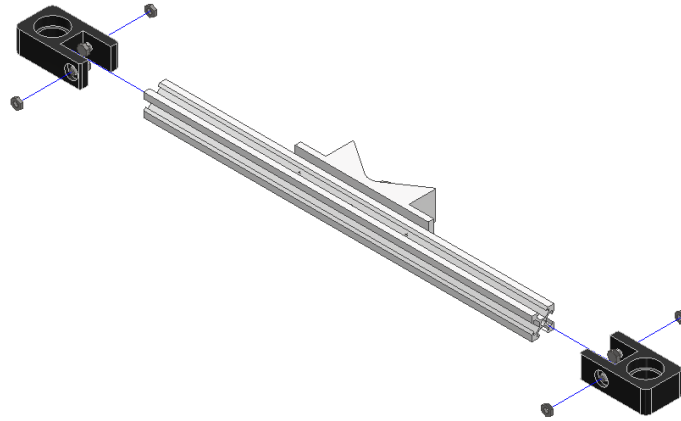
6. Ensamble un eje central en cada soporte central por la sección con diámetro mayor.



7. Utilizando 2 tornillos T ensamble la leva a un perfil horizontal y coloque tuercas M5 sin apretar.

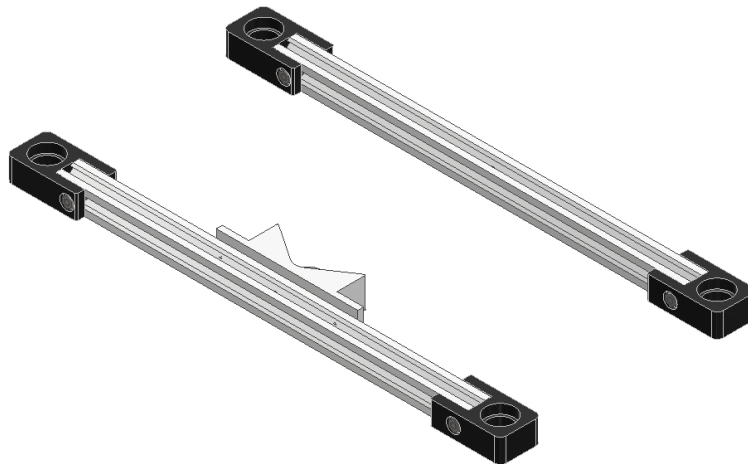


8. Utilizando 4 tornillos T, ensamble 2 soportes laterales al perfil horizontal anterior, teniendo en cuenta que el agujero del perfil esté alineado a las cavidades de los soportes, al finalizar fíjelos con tuercas M5.

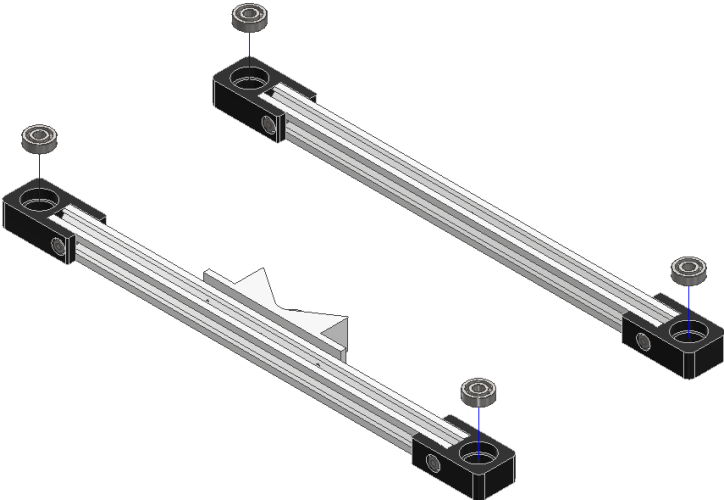


x

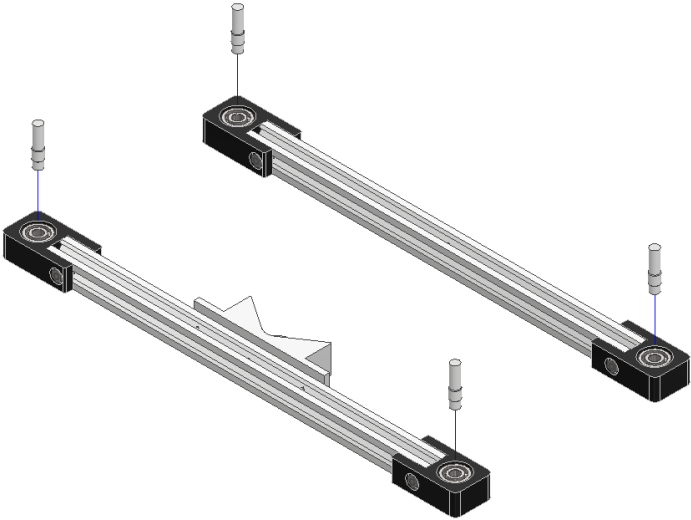
9. Repetir el paso anterior con el otro perfil horizontal.



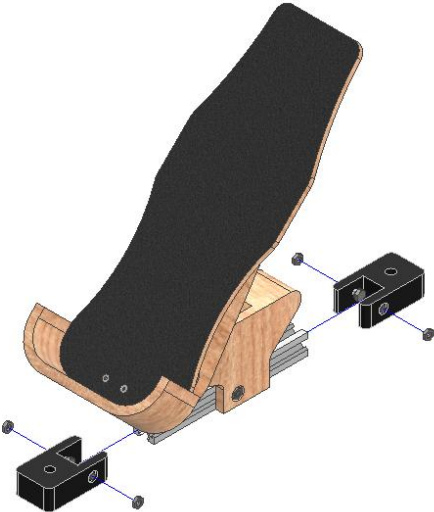
10. Ensamble 4 cojinetes en las cavidades de los soportes laterales.



11. Ensamble los 4 ejes laterales en los extremos de los perfiles horizontales por la sección más corta.



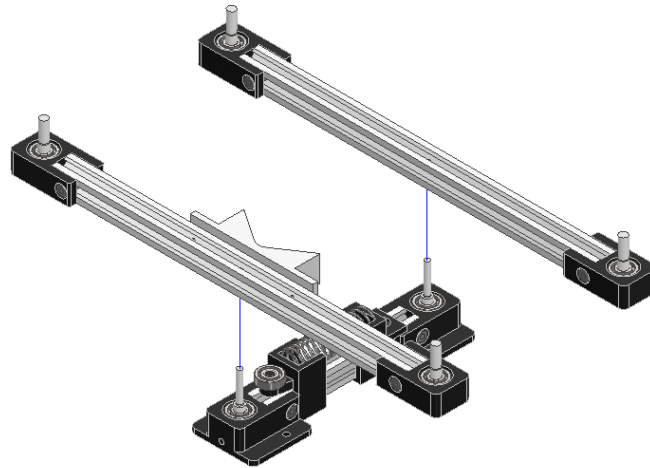
12. Utilizando 4 tornillos T, ensamble 2 soportes laterales complementarios a un perfil transversal y fijar con tuercas M5.



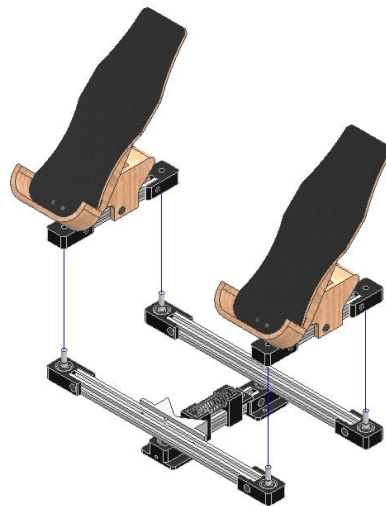
13. Repita el proceso con el perfil transversal faltante.



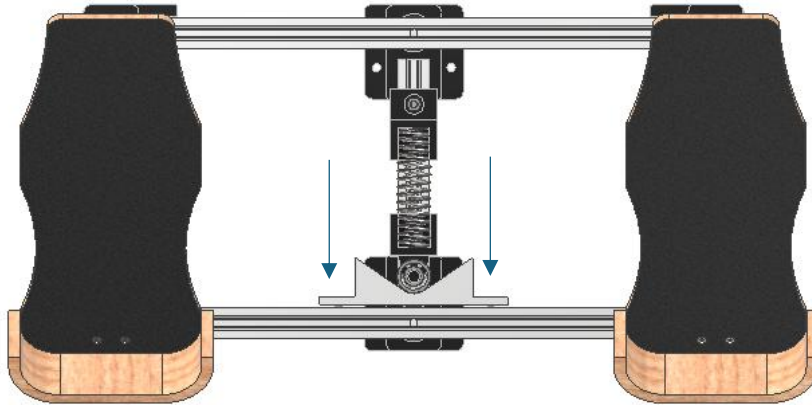
14. Ensamble los perfiles horizontales en los ejes centrales introduciendo los agujeros de los perfiles en los ejes.



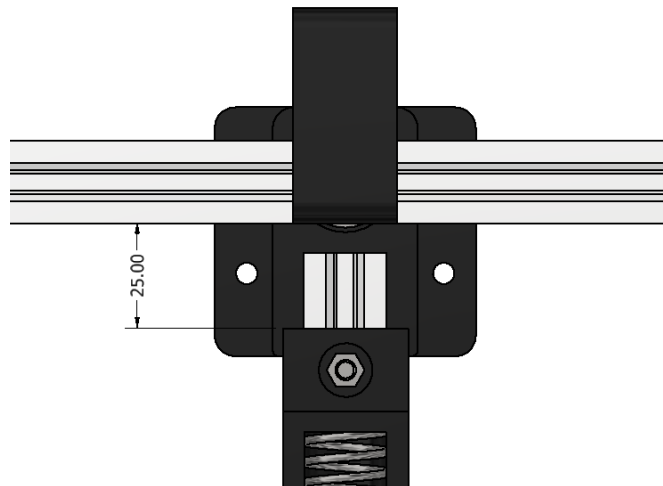
15. Ensamble los perfiles transversales introduciendo los extremos en los ejes laterales.



16. Alinee la leva de forma que esté centrada respecto al perfil y ajuste los tornillos que se muestran en la figura.



17. Ajuste la posición del soporte de resorte a 10 mm del soporte central y ajuste con una tuerca M5.



18. Revise todo el mecanismo para asegurarse que esté alineado y funcione correctamente.



# Manual de fabricación para pedales

## Introducción

Este manual indica los pasos necesarios para el maquinado de las piezas que no se pueden adquirir comercialmente, como los ejes y los pedales. Estas partes requieren un proceso de fabricación en específico. Para cada componente, se detallan las herramientas adecuadas para su correcta elaboración. Además, se recomienda utilizar los planos del modelo como material de apoyo durante todo el proceso de maquinado, asegurando la precisión y funcionalidad de las piezas. El uso de las máquinas y herramientas debe realizarse siempre bajo la supervisión de un profesional.

## Maquinado de ejes

1. Para maquinar los 3 ejes, se compró una barra de acero CD 1018 de la cual se cortaron los largos necesarios para cada eje.



2. Se utilizó el torno para obtener las medidas correspondientes a cada eje.

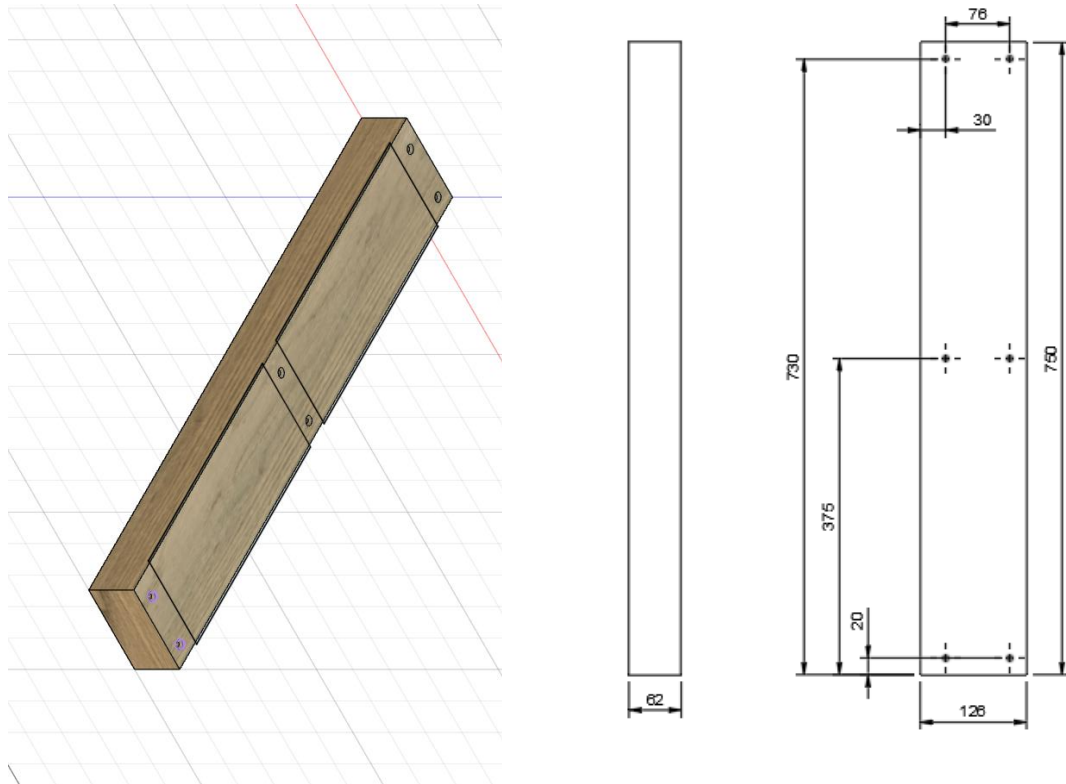


## Maquinado de los pedales

Ambos pedales fueron maquinados a partir de una pieza de stock previamente cepillada hasta las dimensiones indicadas posteriormente en un equipo CNC modelo HAAS VF-1.

### 1. Stock

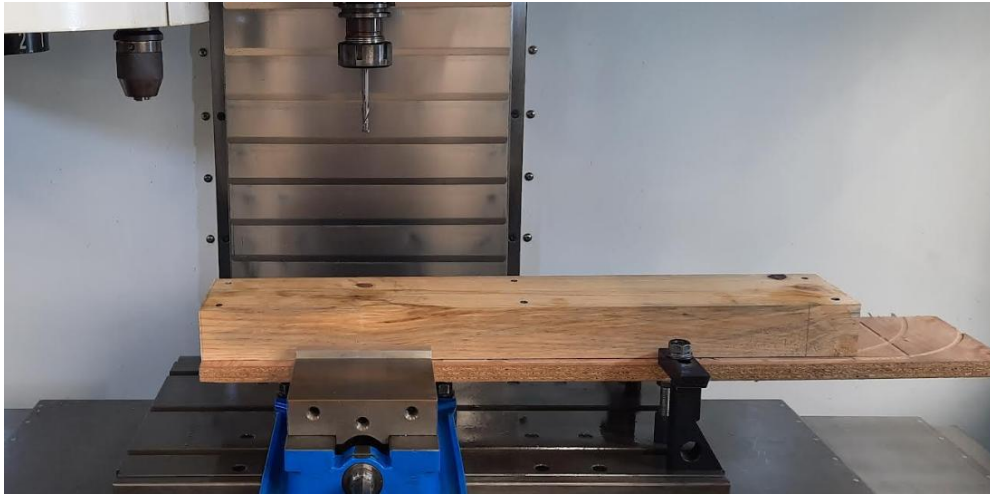
El stock es una pieza de madera de pino con las dimensiones (en milímetros), también se detalla la posición de agujeros guía de 3mm de diámetro.



## 2. Montaje

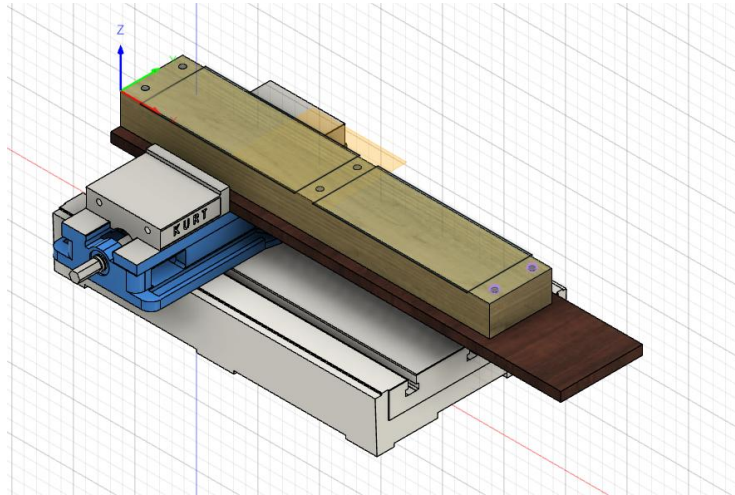
El montaje se compone de las siguientes partes:

- Mesa de trabajo del equipo HAAS VF-1
- Prensa Kurt
- Material de sacrificio
- Stock
- Tornillos 1/4" x 3" para madera



Descripción del montaje:

- a) El stock está anclado a una pieza de Plywood denominada material de sacrificio mediante los tornillos en los agujeros guía realizados al stock.
- b) El material de sacrificio va sujeto a la prensa kurt asentado sobre la misma ya que el propósito de dicho material era poder penetrar todo el stock sin dañar la prensa.



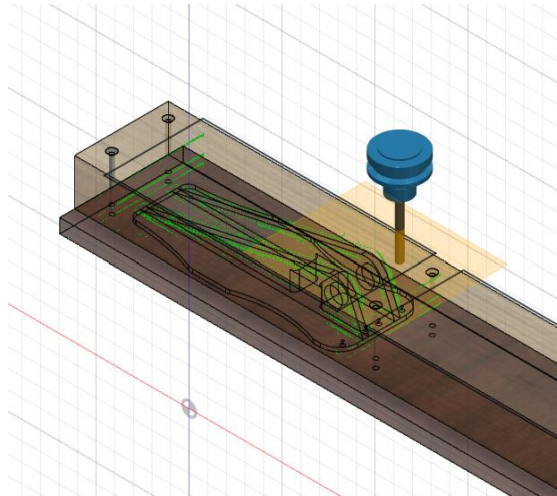
### 3. Herramientas

Se utilizaron las siguientes herramientas:

- Fresa plana de 3/8" 2 hilos y 3" de largo

### 4. Operaciones

- Desbaste 3D adaptativo: Tiene el propósito de retirar todo el material de la base del pedal y realizar un desbastado escalonado para lograr el ángulo en la geometría del pedal.
- Contorno 2D: Tiene el propósito de separar el pedal del resto del stock maquinando el contorno del mismo.



### 5. Parámetros de corte

- Desbaste 3D adaptativo:
  - a. Velocidad del husillo: 7300 rpm
  - b. Velocidad de corte: 1219 mm/min
  - c. Avance por diente: 0.0835 mm
  - d. Reducción de desbaste máxima: 23.81 mm
  - e. Reducción fina: 2.38 mm
- Contorno 2D:
  - a. Velocidad del husillo: 7300 rpm
  - b. Velocidad de corte: 1219 mm/min
  - c. Avance por diente: 0.0835 mm