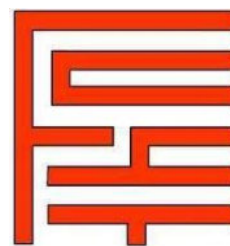


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PERIFÉRICO MECÁNICO
MODULAR Y RADIO STACK PARA EL SIMULADOR DE VUELO
MICROSOFT FLIGHT SIMULATOR 2020**

Proyecto de grado, presentado para optar al Diploma Académico de Licenciatura en
Ingeniería Electrónica

Presentado por: Adrián Zegarra Velasco

Tutor: Ing. José A. Urrutia Medrano

Cochabamba-Bolivia

Junio, 2024

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado a mis cuatro abuelos, Mario Velasco, Lizzel Rico, Teresa Dorado y Roberto Zegarra. Aunque todos han jugado un papel importante en mi vida, este proyecto es especialmente para Roberto, quien nos dejó el año pasado.

Mi abuelo Roberto, quien fue mi pilar fundamental y me introdujo en el mundo de la aviación y la tecnología. Este proyecto era, es por y para ti. Siempre me preguntabas si ya había terminado para que tú lo usaras, te alegrabas de cada pequeño paso que daba en mi proyecto. Siempre me alentabas a seguir adelante a pesar de cada obstáculo. Te extraño más de lo que las palabras pueden expresar, y este proyecto es un testimonio de tu influencia en mi vida.

A todos ustedes, los amo con mi vida y no saben cuánto los extraño. Seguiré con su legado, dejando huella en este mundo. Este proyecto es un tributo a ustedes, a su amor, a su apoyo y a las lecciones que me enseñaron. Gracias por todo.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar, agradezco a mi padre, Luis Roberto Zegarra Dorado, y a mi madre, María Del Carmen Velasco Rico, por su amor incondicional, apoyo y aliento en cada paso de este viaje. Su fe en mí y su constante motivación han sido la fuerza impulsora detrás de todos mis esfuerzos.

A mi hermano, Santiago Zegarra Velasco, le agradezco por estar siempre a mi lado, compartiendo risas y desafíos, y por ser una fuente constante de inspiración y apoyo.

Un agradecimiento especial a mi tío, Roy Rico Mercado, cuya guía y asesoramiento han sido invaluable en este proyecto. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para el éxito de este trabajo. Sin él, este proyecto no habría sido posible.

Un agradecimiento enorme a mi tutor, al Ing. José Antonio Urrutia Medrano. Su orientación y apoyo han sido fundamentales en la realización de este proyecto y en el transcurso de los 5 años de carrera en las materias que curse con él. Su paciencia, conocimiento y dedicación han sido una fuente constante de inspiración. Gracias por tu inestimable contribución a este proyecto. Tu guía ha sido esencial en cada paso del camino

También quisiera agradecer a mis amigos cercanos, que han estado conmigo en cada paso del camino, proporcionando apoyo, aliento y, a veces, distracciones necesarias. Su amistad significa el mundo para mí.

Finalmente, agradezco a todos los que han estado involucrados en este proyecto, directa o indirectamente. Cada uno de ustedes ha jugado un papel en hacer de este proyecto lo que es, y por eso estoy eternamente agradecido.

Gracias de todo corazón a ustedes, este proyecto de grado no es solo un logro académico, sino también un testimonio del amor, el apoyo y la guía que he recibido de cada uno de ustedes.

RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad, el Microsoft Flight Simulator 2020 se destaca como una herramienta relevante tanto para los entusiastas de la aviación como para aquellos con recursos limitados que desean experimentar la sensación de volar en un entorno simulado.

En el mercado actual, empresas especializadas como Logitech y Turtle Beach ofrecen una amplia gama de periféricos para simuladores de vuelo. Sin embargo, muchos de estos dispositivos son costosos, difíciles de mantener, no son modulares y carecen de capacidad de reprogramación, lo que dificulta su accesibilidad para una gran cantidad de personas.

Además, existen varios simuladores de vuelo en el mercado, cada uno con características únicas. X-Plane, Lockheed Martin's Prepar3D, Microsoft Flight Simulator X y Microsoft Flight Simulator 2020 son algunos de los más conocidos, ofreciendo diferentes niveles de realismo y funcionalidad.

Este proyecto se enfoca en la creación de un periférico mecánico modular y un radio stack para el Microsoft Flight Simulator 2020, con el objetivo de mejorar la experiencia del usuario al proporcionar una interacción más realista con el simulador. El periférico modular incluye controles de vuelo, palancas de potencia y pedales de dirección y freno, diseñados para adaptarse a diferentes tipos de aeronaves.

Se diseñan placas PCB y se aplica la soldadura de componentes y cableado del radio stack, que incluye módulos para el código transponder, la radionavegación y las frecuencias de comunicación. Para mejorar la accesibilidad del proyecto, se utiliza una combinación de materiales de bajo costo y tecnología de impresión 3D, lo que ha resultado en una reducción significativa de los costos totales y una mayor flexibilidad en el diseño.

El proyecto concluye exitosamente al implementar y comparar el funcionamiento individual de cada módulo con los módulos virtuales preexistentes en el simulador, obteniendo resultados precisos. Esto representa una contribución significativa al campo de los periféricos para simuladores de vuelo de bajo costo, y abre nuevas oportunidades para que los entusiastas de la simulación de vuelo desarrollen sus propios dispositivos, basándose en los resultados obtenidos aquí.

Palabras clave: Simulador de vuelo, periféricos modulares, Microsoft Flight Simulator 2020, accesibilidad, impresión 3D.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1 Control de vuelo de superficies horizontales	13
1.2 Palancas de potencia del motor del avión.	13
1.3 Control de vuelo de superficies verticales y freno para cuando la aeronave está en tierra	14
1.4 Compensador o Trim Wheel	14
1.5 Radio Stack	15
1.5.1 Módulo de código transponder	15
1.5.2 Módulo de radionavegación.....	15
1.5.3 Módulo de frecuencias de comunicación.....	16
1.6 Antecedentes	16
1.6.1 Logitech:	18
1.6.2 Turtle Beach:.....	19
1.6.3 X-Plane:	19
1.6.4 Lockheed Martin's Prepar3D:	20
1.6.5 Microsoft Flight Simulator X:	20
1.6.6 Microsoft Flight Simulator 2020:	21
1.7 Planteamiento de problema	21
1.7.1 Identificación del problema	22

1.7.2 Formulación del problema	23
1.8 Objetivos	23
1.8.1 Objetivo general.....	23
1.8.2 Objetivos específicos	23
1.9 Alcances	23
1.10 Limitaciones:.....	25
1.11 Justificación:	25
1.12 Metodología	26
CAPITULO 2	28
MARCO TEÓRICO	28
2.1 Arduino	28
2.2 Comunicación serial.....	31
2.3 Baud rate	32
2.4 Comunicación SPI.....	32
2.5 Comunicación I2C	34
2.6 Comunicación USB HID.....	36
2.7 Pulsador momentáneo	39
2.8 Pantalla LCD 16x2 con I2C	40
2.9 Circuito integrado MAX7219	40
2.10 Circuito integrado MCP23017	43

2.11 Display de 7 segmentos y 3 dígitos.....	43
2.12 Rotary encoder	44
2.13 Programa Bits and Droids Flight Connector	46
2.14 Impresora 3D.....	48
2.15 Autodesk Fusion 360.....	49
2.16 Proteus.....	50
2.17 Placa PCB (Prototyping Circuit Board)	51
CAPITULO 3	53
INGENIERÍA DEL PROYECTO	53
3.1 Introducción	53
3.2 Determinación de las especificaciones a cumplir	53
3.3 Identificación de alternativas comerciales de sistemas, equipos o piezas.....	56
3.4 Definición de criterios de evaluación.....	56
3.5 Selección de las alternativas óptimas.....	58
3.6 Diseño del prototipo (Hardware y Software)	63
3.6.1 Diseño prototipo del hardware del radio stack	64
3.6.2 Diseño prototipo del software del radio stack	74
3.6.3 Simulación del radio stack.....	75
3.6.4 Diseño del hardware del periférico mecánico modular	76
CAPITULO 4	81

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	81
4.1 Introducción	81
4.2 Montaje y funcionamiento del prototipo	81
4.2.1 Construcción y puesta en marcha de la versión 1 del prototipo del radio stack	81
4.2.2 Construcción y puesta en marcha de la versión final del prototipo del radio stack	82
4.2.3 Resultados de la validación del prototipo del radio stack (pruebas y ajustes)	88
4.3 Construcción y puesta en marcha de la versión 1 del prototipo del periférico mecánico modular	89
4.3.1 Construcción y puesta en marcha de la versión final del prototipo del periférico mecánico modular	91
4.3.2 Resultados de la validación del prototipo final del periférico mecánico modular (pruebas y ajustes)	97
4.3.3 Diagrama circuital final del radio stack y el periférico mecánico modular ...	98
CAPITULO 5	99
EVALUACION FINANCIERA (COMPARADA)	99
5.1 Inversiones requeridas (Costos)	99
5.1.1 Inversiones requeridas para el radio stack	99
5.1.2 Inversiones requeridas para el periférico mecánico modular	99

5.1.3 Inversión total para el proyecto desarrollo e implementación de un periférico mecánico modular y radio stack para el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020.....	101
5.2 Gastos de funcionamiento	102
5.3 Relación Beneficio/Costo comparado con un sistema	102
equivalente disponible en el mercado	102
CAPITULO 6	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
6.1 Conclusiones	105
6.2 Recomendaciones.....	106
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	107
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS.....	113
ANEXO A Pines IC MAX7219	113
ANEXO B Pines IC MCP23017	113
ANEXO C Link del repositorio de GitHub del proyecto realizado	114
ANEXO D Manual de armado y piezas para el control de vuelo de superficies verticales y horizontales	114
ANEXO E Manual de armado y piezas para las palancas de potencia del motor del avión.....	123
ANEXO F Manual de armado y piezas para los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra	126

ANEXO G Encuestas de satisfacción del usuario.....	126
--	-----

ÍNDICE FIGURAS

<u>Figura 1. Control de vuelo</u>	13
<u>Figura 2. Palanca de potencias.....</u>	13
<u>Figura 3. Pedales de dirección y freno (2006)</u>	14
<u>Figura 4. Compensador o Trim Wheel</u>	14
<u>Figura 5. Radio stack</u>	15
<u>Figura 6. Flight Yoke System</u>	18
<u>Figura 7. Flight Simulator Rudder Pedals</u>	18
<u>Figura 8. TurtleBeach Velocity One</u>	19
<u>Figura 9. Xplane 11</u>	20
<u>Figura 10. Prepar3D.....</u>	20
<u>Figura 11. Microsoft Flight Simulator X.....</u>	21
<u>Figura 12. Microsoft Flight Simulator 2020</u>	21
<u>Figura 13. Árbol de problemas</u>	22
<u>Figura 14. Metodología proyecto.....</u>	27
<u>Figura 15. Arduino Uno Rev3</u>	29
<u>Figura 16. Arduino Mega 2560 Rev3</u>	29
<u>Figura 17. Arduino Micro</u>	30
<u>Figura 18. Arduino Leonardo</u>	30
<u>Figura 19. Comunicación serial</u>	31
<u>Figura 20. Conexión física comunicación serial.....</u>	31
<u>Figura 21. Diagrama de tiempo del baud rate.....</u>	32
<u>Figura 22. Conexión en paralelo SPI.....</u>	33
<u>Figura 23. Conexión serie SPI</u>	33

<u>Figura 24. Diagrama conexión física comunicación I2C.....</u>	34
<u>Figura 25. Diagrama de pines comunicación USB.....</u>	36
<u>Figura 26. Tipos de conectores USB</u>	37
<u>Figura 27. Diagrama de conexión USB-HID con la PC.....</u>	39
<u>Figura 28. Tipos de pulsadores momentáneos.....</u>	39
<u>Figura 29. Pulsador NA y NC.....</u>	40
<u>Figura 30. Pantalla LCD 16x2 I2C</u>	40
<u>Figura 31. Selección resistencia ISET MAX7219.....</u>	41
<u>Figura 32. Diagrama de conexión MAX7219</u>	41
<u>Figura 33. Conexión multiplexado entre el MAX7219 y los displays de 7 segmentos..</u>	42
<u>Figura 34. Diagrama de pines del MAX7219.....</u>	42
<u>Figura 35. Diagrama de pines del IC MCP23017.....</u>	43
<u>Figura 36. Diagrama de pines del display 7 segmentos y 3 dígitos.....</u>	44
<u>Figura 37. Rotary encoder</u>	45
<u>Figura 38. Conexión interna rotary encoder</u>	45
<u>Figura 39. Rotación izquierda rotary encoder</u>	46
<u>Figura 40. Rotación derecha rotary encoder.....</u>	46
<u>Figura 41. Logo Bits and Droids</u>	47
<u>Figura 42. Diagrama de conexión de Bits and Droids Connector</u>	47
<u>Figura 43. Secuencia de pasos para imprimir con impresora 3D</u>	48
<u>Figura 44. Logotipo Autodesk Fusion 360.....</u>	49
<u>Figura 45. Logotipo Proteus</u>	50
<u>Figura 46. Placa PCB nueva</u>	51
<u>Figura 47. Ancho pistas y corriente máxima</u>	51
<u>Figura 48. Componentes placa PCB</u>	52

<u>Figura 49. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la primera parte del proyecto</u>	53
<u>Figura 50. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la segunda parte del proyecto</u>	55
<u>Figura 51. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la primera parte del proyecto finalizada la selección de sistemas, equipos o piezas</u>	59
<u>Figura 52. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la segunda parte del proyecto finalizada la selección de sistemas, equipos o piezas</u>	62
<u>Figura 53. Representación visual del radio stack.....</u>	64
<u>Figura 54. Diagrama circuital displays 7 segmentos COM 1, 2 y NAV 1,2</u>	66
<u>Figura 55. Diagrama circuital 2 de displays 7 segmentos</u>	67
<u>Figura 56. Diseño final placa PCB</u>	68
<u>Figura 57. Diseño final placa PCB 3D cara anterior</u>	68
<u>Figura 58. Diseño final placa PCB 3D cara posterior.....</u>	68
<u>Figura 59. Diagrama circuital de botones y rotaries encoders.....</u>	69
<u>Figura 60. Diseño final placa PCB</u>	70
<u>Figura 61. Diseño final placa PCB 3D</u>	70
<u>Figura 62. Diagrama circuital pantalla LCD DME.....</u>	71
<u>Figura 63. Diagrama circuital pantalla LCD y rotary encoder XPNDR.....</u>	71
<u>Figura 64. Diagrama circuital pantalla LCD, rotary encoder y pulsador ADF.....</u>	72
<u>Figura 65. Diseño final placa PCB</u>	73
<u>Figura 66. Diseño final placa PCB 3D</u>	73
<u>Figura 67. Diagrama de flujo sketch radio stack</u>	75
<u>Figura 68. Simulación del radio stack</u>	76
<u>Figura 69. Representación visual periférico mecánico modular.....</u>	77
<u>Figura 70. Nomenclatura periférico mecánico modular</u>	78

<u>Figura 71. Diagrama de flujo sketch periférico mecánico modular.....</u>	80
<u>Figura 72. Proceso de soldadura prototipo v1 radio stack.....</u>	81
<u>Figura 73. Resultado final del prototipo v1 del radio stack.....</u>	82
<u>Figura 74. Impresión parte trasera diagrama circuital display 7 segmentos COM y NAV.....</u>	83
<u>Figura 75. Impresión parte delantera circuital display 7 segmentos COM y NAV</u>	83
<u>Figura 76. Impresión parte delantera circuital display 7 segmentos COM y NAV finalizada.....</u>	84
<u>Figura 77. Impresión parte trasera circuital display 7 segmentos COM y NAV finalizada.....</u>	84
<u>Figura 78. Perforación placa PCB con maquina CNC.....</u>	85
<u>Figura 79. Placa PCB ya terminada.....</u>	85
<u>Figura 80. Placa PCB con componentes ya soldados</u>	85
<u>Figura 81. Placa PCB ya terminada.....</u>	86
<u>Figura 82. Placa PCB con componentes ya soldados</u>	86
<u>Figura 83. Panel radio stack con todos componentes eléctricos y placas PCB</u>	87
<u>Figura 84. Shield industrial Arduino Mega2560</u>	88
<u>Figura 85. Potenciómetro tipo B.....</u>	90
<u>Figura 86. Potenciómetros deslizantes.....</u>	90
<u>Figura 87. Pulsadores.....</u>	90
<u>Figura 88. Vista frontal del resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales</u>	91
<u>Figura 89. Vista lateral resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales</u>	92
<u>Figura 90. Vista superior de la construcción finalizada de las palancas de potencia del motor del avión</u>	93

<u>Figura 91. Vista frontal de la construcción finalizada de las palancas de potencia del motor del avión.....</u>	94
<u>Figura 92. Vista superior de la construcción finalizada de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra</u>	95
<u>Figura 93. Vista lateral de la construcción finalizada de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra</u>	96
<u>Figura 94. Diagrama circuital final del radio stack</u>	98
<u>Figura 95. Diagrama circuital final periférico mecánico modular.....</u>	98

INDICE TABLAS

<u>Tabla1. Resumen características de los Arduinos.....</u>	56
<u>Tabla 2. Requerimiento del radio stack</u>	58
<u>Tabla 3. Requerimiento del módulo periférico mecánico modular</u>	58
<u>Tabla 4. Componentes electrónicos para el radio stack.....</u>	65
<u>Tabla 5. Componentes electrónicos para el radio stack.....</u>	78
<u>Tabla 6. Inversión para el radio stack</u>	99
<u>Tabla 7. Inversión para las palancas de potencia del avión</u>	100
<u>Tabla 8. Inversión para para el control de vuelo de superficies verticales y horizontales.....</u>	100
<u>Tabla 9. Inversión para los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra.....</u>	101
<u>Tabla 10. Inversión total para el proyecto</u>	101
<u>Tabla 11. Gastos funcionamiento</u>	102
<u>Tabla 12. Comparación de costos de productos de Logitech y del proyecto desarrollado.....</u>	103

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

La simulación de vuelo ha ganado un lugar muy importante entre apasionados y aficionados de la aviación, la búsqueda de experiencias de vuelo auténticas y realistas se ha convertido en algo imprescindible. Existen un sinnúmero de simuladores de vuelo, pero entre los más usados están: X-Plane, Prepar3D, Microsoft Flight Simulator X y el más reciente Microsoft Flight Simulator 2020.

El lanzamiento de Microsoft Flight Simulator 2020 (MFS2020) marcó un antes y un después en la industria, al brindar una representación precisa del mundo real. No obstante, uno de los desafíos más significativos que enfrentan los aficionados radica en la dificultad de acceder a periféricos de alta calidad debido a su elevado coste, y es justamente por aquel problema que surge este proyecto de grado. Para permitir que cualquier individuo, sin importar sus limitaciones presupuestarias, tenga la capacidad de disfrutar de un periférico de bajo coste que garantice una experiencia satisfactoria y realista, sin sacrificar la calidad.

El propósito principal de este proyecto es desarrollar un periférico mecánico modular y radio stack accesible que garantice una experiencia satisfactoria y realista, sin comprometer la calidad, y que sea asequible para cualquier persona, independientemente de sus limitaciones presupuestarias.

En este contexto, se exploran los campos de la ingeniería, la creatividad y la innovación. Se abordan los fundamentos teóricos de cada componente, el diseño conceptual, la implementación práctica y los resultados obtenidos durante el proceso de construcción del simulador de vuelo de bajo costo. Además, se presentan soluciones ingeniosas desarrolladas para superar los desafíos específicos planteados por este proyecto.

Las conclusiones obtenidas tras la finalización del proyecto demuestran la viabilidad de tales iniciativas y su potencial para ampliar el acceso a la simulación de vuelo de calidad. Asimismo, se brindan recomendaciones para futuros desarrollos, con el objetivo de mejorar aún más la accesibilidad y la experiencia del usuario.

El proyecto consta de los siguientes submódulos que se explicarán a continuación.

1.1 CONTROL DE VUELO DE SUPERFICIES HORIZONTALES

Más conocido como Joystick o yoke dependiendo del tipo de aeronave y sirve para elevar o bajar la nariz de la aeronave y girar a la derecha o izquierda y tiene una forma física como la figura 1.



Figura 1. Control de vuelo

Fuente: How to Update Your Cessna Yoke | Cessna Owner Organization (2021)

1.2 PALANCAS DE POTENCIA DEL MOTOR DEL AVIÓN.

En el vuelo de un avión, existen tres palancas fundamentales, Throttle (Potencia) que esta de color negro, Propeller (Hélice) que es la palanca de color azul y Mixture (Mezcla) que es la de color rojo, permiten un control preciso del rendimiento del motor. Throttle ajusta la potencia del motor, Propeller modifica la eficacia de la hélice y la velocidad del avión, y Mixture regula la combinación de aire y combustible para optimizar el rendimiento del motor en diversas condiciones. Como se puede observar en la figura 2.

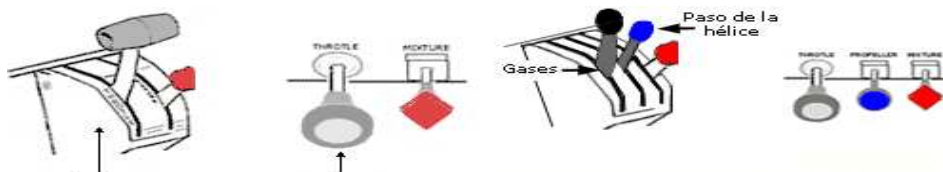


Figura 2. Palanca de potencias

Fuente: Vuelo instrumental básico ASOC. PASIÓN POR VOLAR (2016)

1.3 CONTROL DE VUELO DE SUPERFICIES VERTICALES Y FRENO PARA CUANDO LA AERONAVE ESTÁ EN TIERRA

Se usan los pedales para poder maniobrar la aeronave en tierra (Girar a la izquierda o derecha) y para poder frenarlo si es necesario, y en vuelo se usa para girar la aeronave sobre su propio eje logrando tener giros más finos en el aire y tiene una forma física como la figura 3.



Figura 3. Pedales de dirección y freno (2006)

Fuente: CESSNA 172 NOSE LEG AND RUDDER PEDALS FOR THE CRUISER

1.4 COMPENSADOR O TRIM WHEEL

Su propósito es liberar la fuerza que se necesita ejercer en el control de vuelo al girar la rueda hacia arriba o abajo, logrando obtener una estabilidad en la aeronave sin mucho desgaste físico del piloto, es decir mantendrá la nariz del avión nivelada y el piloto no tendrá que accionar el control de vuelo en todo momento y tiene una forma física como la figura 4.



Figura 4. Compensador o Trim Wheel

Fuente: File:Cessna-172-trim-control (2007)

1.5 RADIO STACK

Se utiliza para toda la radiocomunicación y navegación en el vuelo de una aeronave y consta de varios módulos de radiofrecuencia y tiene una forma física como la figura 5.



Figura 5. Radio stack

Fuente: Radios de comunicaciones y de navegación (2011)

Los módulos con los que consta el radio stack son los 3 siguientes:

1.5.1 Módulo de código transponder

Todas las aeronaves tienen que contar con un transpondedor para el control de tráfico aéreo. Tiene como función comunicar la identificación de la aeronave que consta de 4 dígitos, así como datos necesarios para la correcta posición de la plataforma (como altura barométrica, velocidad y demás información de interés).

1.5.2 Módulo de radionavegación

Es una radio Receptora que está constituida por 3 submódulos:

- El primer submódulo consta de 2 receptores AM conocidos como nav1 y nav2 o standby las cuales se sintoniza con la frecuencia de un VOR (Very High Omnidirectional Range - Radiofaro Omnidireccional De Muy Alta Frecuencia), que puede variar entre 108,000 hasta 117,950 MHz.

- El segundo submódulo conocido como ADF (Automatic Direction Finder - Buscador de dirección automático) que su función es ubicar transmisores AM (530 kHz hasta 1700 kHz) para determinar la dirección con respecto al avión.
- El tercer submódulo conocido como DME (Distance Measuring Equipment - Equipo de medición de distancia) que permite establecer la distancia entre la aeronave y una estación emisora VOR.

1.5.3 Módulo de frecuencias de comunicación

Es una radio Receptora/Emisora y está constituida por el siguiente submódulo:

- Se trata de 2 Emisores/Receptores AM conocidos como COM1 y COM2 y sus respectivos standby (frecuencia en espera), todas las emisoras mencionadas, se sintonizan con la frecuencia de una estación de radio ubicada en la torre de control de cada aeropuerto para poder comunicarse entre la torre de control y los pilotos, la frecuencia puede variar entre 118,000 hasta 136,990 MHz.

1.6 ANTECEDENTES

Desde el origen del ser humano, siempre se tuvo el deseo de volar y a lo largo de todo el tiempo han tenido fracasos como aciertos, muchas personas decían que era imposible volar, siendo los hermanos Wright el 17 de Diciembre de 1903 las primeras personas en poder realizar el vuelo de una aeronave controlado por ellos mismos, a partir de ese momento las mejoras comenzaron a suceder de tal manera que cada vez los aviones volaban distancias más largas, eran menos pesados, más eficientes, la introducción de radiocomunicaciones para poder establecer comunicaciones de la aeronave hacia una torre de control o bien de una aeronave a otra, así llegando a la aviación que conocemos hoy en día con grandes avances tanto en diseño estructural como en diseño de aviónica.

Lawrence Sperry es uno de los pioneros de la aviación debido a que creó el “piloto automático” en 1912 utilizando el principio de un girocompás, desde ese entonces la aviónica no dejó de evolucionar hasta llegar a sistemas electrónicos de radiocomunicaciones (ADF, VOR, Transponder, Radar, etc).

Como toda tecnología comenzó siendo analógica para que luego en estos días por el avance tecnológico se sustituya por una versión digitalizada de los mismos, siendo así anteriormente las cabinas implementadas por solo relojes analógicos y ahora pantallas o

“Displays” digitales amplias que llegan a ser más intuitivas y cómodas para consultar cualquier tipo de información requerida por la tripulación del avión.

Por consecuencia de todos estos avances tecnológicos, se ha hecho esencial el uso de simuladores para poder entrenar a las tripulaciones dado por la complejidad que se ha alcanzado, existen varios tipos de simuladores para:

- Entrenamiento de las tripulaciones (Pilotos) usando como herramienta profesional y pueden ser de las siguientes categorías:
 - Categoría A: Pueden ser utilizados para la instrucción inicial de una nueva tripulación en un equipo nuevo para eventos específicos.
 - Categoría B: Pueden ser utilizados para la instrucción inicial de una nueva tripulación en un equipo nuevo y para realizar despegues y aterrizajes nocturnos o diurnos.
 - Categoría C: Pueden ser utilizados para la instrucción inicial de una nueva tripulación en un equipo nuevo pero muy similar al real o para ganar horas de vuelo y poder tener una calificación respecto a su competencia.
 - Categoría D: Son los simuladores de vuelo más realistas y complejos porque rinde igual que la aeronave real, ya que son una réplica completa de una marca de fabricantes de aviones, se puede lograr una certificación acorde a la competencia requerida en una aeronave específica.
- Aficionados a la aviación: Su economía no les permite pagar el curso de pilotaje, así pudiendo simular toda la experiencia de la vida real de un vuelo en un simulador a un costo mucho menor ya que dependerá de un programa para PC y periféricos para su interacción.

Debido a que existen simuladores para aficionados, existe una multitud de hardware y software de código abierto (Arduino, PIC, etc) para las personas que no cuentan con recursos para adquirir simuladores de alto costo por las empresas que los desarrollan como Logitech, Genius, Turtle Beach, ThrustMaster, Saitek, etc. Llegando a tener un gran nivel de realismo y es por ello que en este proyecto se lleva a cabo el desarrollo, e

implementación de un periférico modular y un stack de radio para el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020.

1.6.1 Logitech:

Es una empresa suiza enfocada en la innovación y la calidad, diseña productos y experiencias que fue Fundada en 1981 en Lausana, Suiza, y expandiéndose rápidamente a Silicon Valley, Logitech comenzó a conectar a las personas a través de periféricos informáticos innovadores, incluido el mouse inalámbrico infrarrojo, el trackball operado con el pulgar, el mouse láser y más.

Dos de los tantos productos que comercializa se encuentran en la figura 6 y 7 respectivamente.



Figura 6. Flight Yoke System

Fuente: Logitech G Flight Simulator Yoke System con cuadrante de aceleración (2020) con un precio de 165 euros que en dólares su equivalente es de 178,24 en su página web.



Figura 7. Flight Simulator Rudder Pedals

Fuente: Logitech G Flight Simulator Rudder Pedals (2020)

Con un precio de 157,36 euros que en dólares su equivalente es de 169,99 en su página web.

1.6.2 Turtle Beach:

Es una empresa que comenzó en 1975 como una pequeña empresa llamada Octave Electronics Y a medida que la industria ha crecido, también lo ha hecho Turtle Beach, desarrollando auriculares para juegos, accesorios de audio avanzados y periféricos de simuladores galardonados para jugadores de todos los ámbitos de la vida.

Uno de los tantos productos que comercializa es el que se encuentra en la figura 8.



Figura 8. TurtleBeach Velocity One

Fuente: Turtle Beach® VelocityOne™ Flight Universal Control System (2021)

Con un precio de 379,95 dólares en su página web.

1.6.3 X-Plane:

Es un videojuego de simulación de vuelo creada por Laminar Research desde 1995, este simulador tiene una gran ventaja respecto a los otros porque es multiplataforma, trata de simular las físicas del mundo real de una manera realista y diferente en cada aeronave como lo es en la vida real debido a la meteorología y aerodinámica de la misma aeronave. Tiene igual la capacidad de simular toda la tierra, pero no con fotogrametría, sino con modelados 3D que no lo hace ser muy realista gráficamente y requiere de mucho software de terceros para tener mejor alcance. Su precio único es de 59,99 dólares y el logo del programa X-Plane se encuentra en la figura 9.



Figura 9. Xplane 11

Fuente: X-Plane 11 logo - X-Plane (2011)

1.6.4 Lockheed Martin's Prepar3D:

Es un videojuego de simulación de vuelo, esta empresa compró el código fuente de Microsoft Flight Simulator X cambiando el nombre a Prepar3D para poder continuar con el desarrollo del mismo dándole muchas mejoras necesarias respecto a la versión original de Microsoft y actualmente está en su quinta versión que salió el 14 de abril de 2020 con más de 24900 aeropuertos y más de 10 aviones. Su precio es de 59,95 dólares y llega hasta los 2300 dólares en su versión Premium y el logo del programa Prepar3D se encuentra en la figura 10.



Figura 10. Prepar3D

Fuente: Prepar3D v5.0 Hotfix 2 Released (2020)

1.6.5 Microsoft Flight Simulator X:

Es un videojuego de simulación de vuelo creado por Aces Game Studio y comercializado por Microsoft en 2006, siendo la décima entrega de la saga Microsoft Flight Simulator con mejoras gráficas y comportamientos físicos de los aviones en el juego, con una cantidad de 18 aviones y más de 24000 aeropuertos. El soporte del Juego fue hasta el 18 de diciembre del 2014. Su precio es de 24,99 dólares en la versión básica y el logo del programa Microsoft flight simulator X se encuentra en la figura 11.



Figura 11. Microsoft Flight Simulator X

Fuente: Flight Simulator X: Buy Online in Bolivia at desertcart (2006)

1.6.6 Microsoft Flight Simulator 2020:

Es un videojuego de simulación de vuelo creada por Asobo Studio y Distribuido por Xbox Game Studios en Julio 18 del 2020, siendo el predecesor del Microsoft Flight Simulator X con la gran capacidad de poder simular toda la tierra con fotogrametría sacada de los mapas de Bing, así logrando ser un simulador fotorealista, con sistemas físicos muy cerca a la realidad. Su precio es de 60 dólares en la versión más básica y llega hasta 120 dólares en la versión premium deluxe y el logo del programa Microsoft Flight Simulator 2020 se encuentra en la figura 12.



Figura 12. Microsoft Flight Simulator 2020

Fuente: Microsoft Flight Simulator (2020)

1.7 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

La primera instancia es la identificación del problema, que se plantea en un árbol de problema en la figura 13, en el que se establecen las causas y efectos.

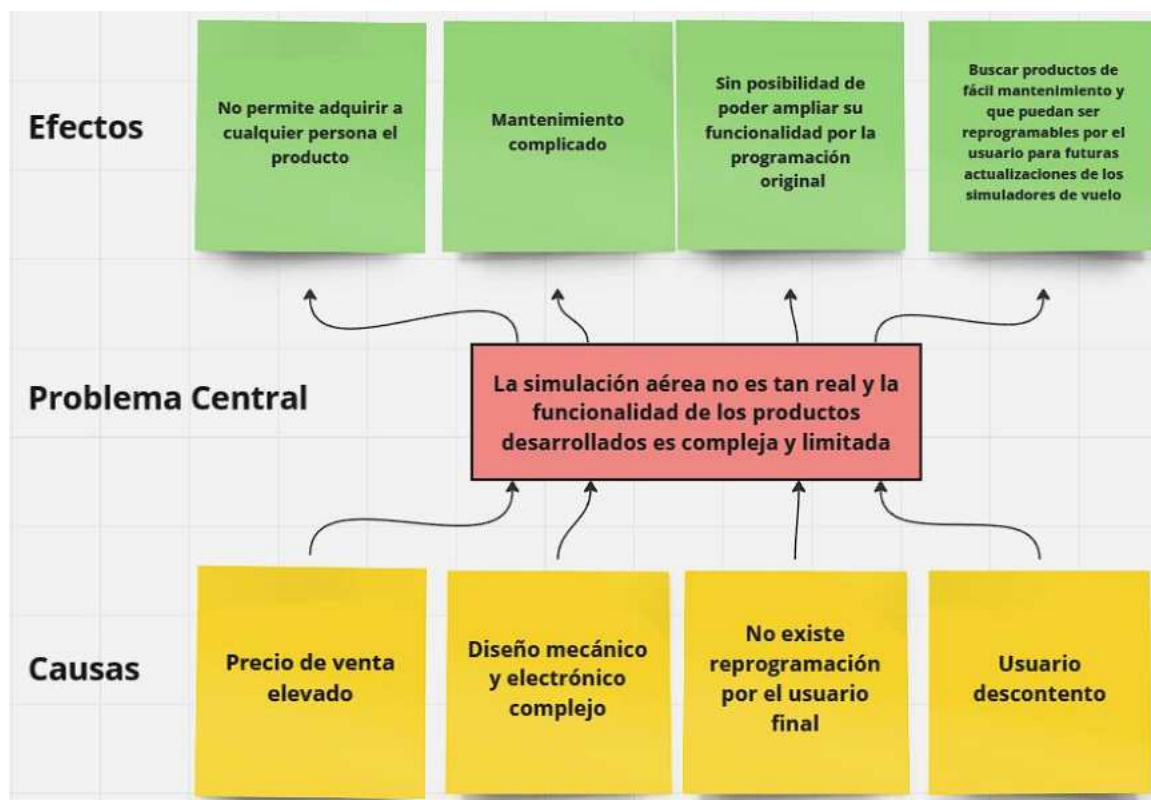


Figura 13. Árbol de problemas

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se realiza una descripción del mismo, para poder concluir con el desarrollo de su formulación.

1.7.1 Identificación del problema

Actualmente el simulador Microsoft Flight Simulator 2020 es de importancia para las personas aficionadas en el rubro de aviación y/o que tienen bajos recursos para cursar la carrera de pilotaje, así pudiendo vivir la experiencia de la vida real en un simulador.

Por esta razón, el simulador de vuelo es la herramienta más importante en las escuelas de aviación debido a que antes de realizar un vuelo con la aeronave se requiere de una familiarización y práctica para posteriormente realizar el vuelo. Si los periféricos del simulador son lo más cercano a la realidad se tiene una mejor experiencia y aprendizaje.

Lamentablemente muchos de los periféricos y radios stacks son de costo muy elevado de construcción, difícil mantenimiento, no modulares y no reprogramables. Estas razones hacen que las personas no puedan acceder fácilmente a los periféricos y radios stacks.

1.7.2 Formulación del problema

¿Cuál será el periférico y radio stack que proporcionará en forma modular una amplia funcionalidad al usuario que utilice el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020?

1.8 OBJETIVOS

Los objetivos planteados para la solución al problema son detallados a continuación.

1.8.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar un periférico mecánico modular y un radio stack de bajo coste para mejorar la experiencia de los usuarios del simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020.

1.8.2 Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos para el simulador
- Construir los controles de vuelo y pedales de dirección y freno.
- Construir las palancas de potencia.
- Construir los módulos de comunicación y navegación por radio.
- Implementar y realizar pruebas de funcionamiento del prototipo.
- Analizar costos del sistema planteado.

1.9 ALCANCES

Se lleva a cabo el diseño de los circuitos electrónicos y la construcción de la estructura requerida para el desarrollo del periférico mecánico modular, el cual incluye:

- Controles de vuelo: Que tiene un sistema de dirección de dos ejes de accionamiento, uno es girarlo sobre su propio eje y el otro es empujarlo fuera del cuerpo de la persona o traerlo hacia el cuerpo de la persona.
- Palancas de potencia: Tiene tres palancas de potencia las cuales pueden ser de accionamiento lineal o semicircular.

- Pedales de dirección y freno: Está constituido por un conjunto de dos pedales, que realizan dos movimientos distintos, uno para la dirección de la aeronave en tierra y vuelo, y otro para frenarlo.
- Módulos Electrónicos de accionamiento físico: Que en gran parte son botones, interruptores, etc. Los cuales podrán ser asignados por el usuario final a una función en específico desde el simulador de vuelo sin programación alguna.

Permitiendo intercambiar las piezas que componen cada uno de los periféricos, dependiendo de la aeronave a utilizar, consiguiendo de esta manera la modularidad.

Se realiza el diseño de los circuitos electrónicos y construcción mecánica necesaria del stack de radio que contempla los siguientes 3 módulos:

- Módulo del código transponder: Que consta de una pantalla y una perilla para introducir el código, mostrarlo y activarlo.
- Módulo de radionavegación: Que consta de dos pantallas ya que existen 2 frecuencias de navegación independientes, ambas tienen sus respectivas frecuencias activas y de espera, junto a perillas y botones para cambiar su frecuencia y colocarla en activa o espera.
- Módulo de frecuencias de comunicación: Que consta de dos pantallas ya que existen 2 frecuencias de radio comunicación independientes, ambas tienen sus respectivas frecuencias activas y de espera, junto a perillas y botones para cambiar su frecuencia y colocarla en activa o espera.

Se realizarán los prototipos respectivos de: los controles de vuelo, palancas de potencia, pedales de dirección y freno, y del stack de radio, para verificar la operatividad del proyecto entero, tanto en nivel de hardware como software.

Para facilitar el desarrollo del código, detección de errores y optimización del mismo, se escribió el código del radio stack que está estructurado diferenciando las partes que lo constituyen y se escribió otro código para el periférico modular.

El radio stack necesita de una aplicación de terceros creada por BitsAndDroids para poder enviar y obtener los datos del simulador del vuelo, mientras que, al periférico modular, Windows lo reconoce como un dispositivo de juego sin necesidad de una aplicación de terceros.

Se realizará la construcción del prototipo del periférico mecánico modular y del radio stack con piezas 3D, madera y varillas de metal de no muy alto costo para mantener el objetivo de poder ser construido por cualquier persona que tenga en su poder este documento, usando las piezas que se realizaron en el proyecto o unas creadas por el usuario final.

1.10 LIMITACIONES:

- El diseño del radio stack y el periférico mecánico modular están basados en la aeronave Cessna 172.
- Las aeronaves que se pueden utilizar para la programación del radio stack, son todas las que trae por defecto el Microsoft Flight Simulator 2020 y también las aeronaves que sean desarrolladas por empresas de terceros, pero que sean implementadas en el Microsoft Flight Simulator 2020.
- El periférico modular y stack de radio son estrictamente para el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020 y no para otros simuladores de vuelo.
- El uso del simulador es para gente aficionada a la aviación y las escuelas de entrenamiento de aviación debido a que requiere de un alto nivel de conocimiento sobre la aviación, los aviones, los instrumentos, las rutas, el clima, las normas, etc. No es un juego casual que se pueda disfrutar sin tener una base teórica y práctica previa.

1.11 JUSTIFICACIÓN:

Con la aplicación del proyecto propuesto se pretende llegar a más personas con gusto por la simulación de aeronaves, elevando su experiencia a un nivel más real; disfrutando del periférico modular al poder intercambiar las piezas que se crearon en este proyecto o unas creadas por el usuario final, sin modificar el funcionamiento principal, solo afectando a la manera de cómo se interactúa físicamente entre el periférico modular y el usuario final, dependiendo de la aeronave que se vaya a utilizar debido a que cada avión es distinto.

Y por último disfrutar del uso del stack de radio para poder cambiar las frecuencias de navegación y de comunicación con la torre de control, eliminando la incomodidad de que todo esté en una sola pantalla y que todas las acciones se las tenga que hacer mediante el mouse y teclado de la PC.

Se hizo uso de materiales de bajo costo e impresión de piezas 3D para el diseño e implementación del periférico modular y stack de radio, así logrando un producto de bajo costo, siendo accesible para que cualquier persona pueda replicarlo. Este producto tiene una ventaja competitiva frente a los que ya existen en el mercado, que tienen un precio promedio entre 200 y 300 dólares (sin envío incluido), dependiendo de la marca, la calidad, las funciones y la compatibilidad. Estos dispositivos suelen estar hechos de plástico o metal de alta calidad, o bien una combinación de ambos. El producto propuesto, en cambio, reduce el gasto en materia prima y en transporte, al estar hecho de materiales de bajo costo e impresión de piezas 3D.

Es un sistema que es modular, con una amplia funcionalidad y de mantenimiento sencillo, es decir, que no está limitado por la programación y construcción original, siendo capaz de realizar uno mismo el mantenimiento de las piezas mecánicas como electrónicas, al poder intercambiar las piezas del periférico modular y poder reprogramar el radio stack. Todo dependiendo de la aeronave a utilizar. De esta manera, aplicando todo lo aprendido en el transcurso de la carrera, desde el diseño de circuitos, programación de microcontroladores y PC, hasta la implementación de los mismos para la realización de una o varias tareas en específico.

1.12 METODOLOGÍA

En el presente proyecto se adoptó la metodología conocida como “ingeniería de Requerimientos”, la cual se visualiza en el diagrama de flujo presentado en la figura 14.

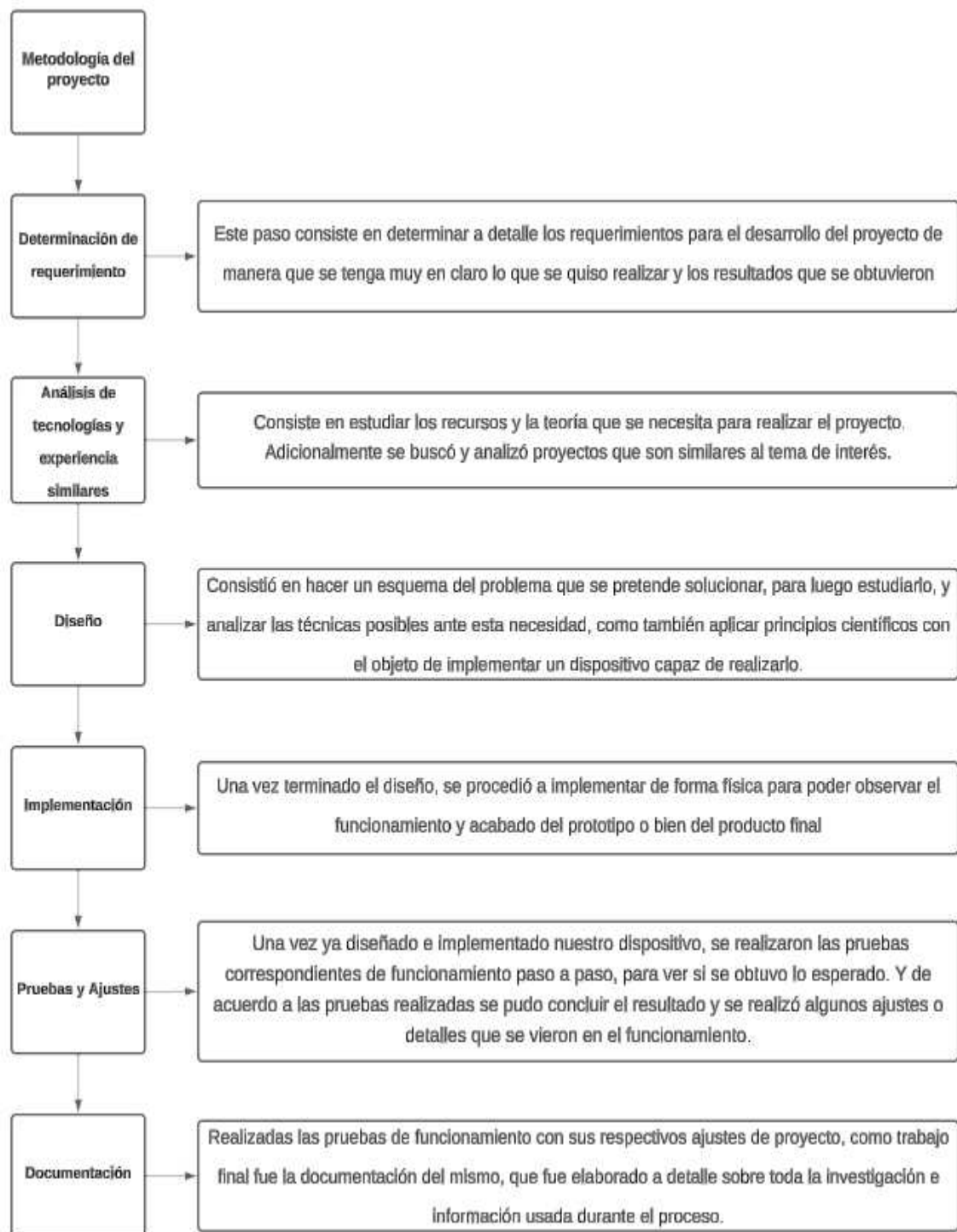


Figura 14. Metodología proyecto

Fuente: Elaboración propia (2024)

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

Se busca establecer las bases conceptuales tanto del software como del hardware que se usó, y las técnicas que se aplicaron, para una mejor comprensión y una exitosa ejecución del proyecto.

2.1 ARDUINO

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto, es decir que está diseñada para ser flexible, fácil y económica para diseñadores, estudiantes de computación, robótica o electrónica y cualquier persona interesada en crear objetos o entornos interactivos basados en la filosofía “hazlo tú mismo” (DIY) ya que se puede compartir libremente cualquier información de los proyectos que uno realiza o de la placa en sí. Arduino está basado en una placa de circuito impreso que contiene un microcontrolador de marca ATMEL que actualmente fue comprado por la empresa MICROCHIP.

Esta placa cuenta con entradas y salidas, tanto analógicas como digitales que permiten conectar de manera sencilla y cómoda diferentes sensores y actuadores a través de sus pines hembra, los cuales están unidos internamente a las patillas de E/S del microcontrolador. Su entorno de desarrollo integrado (IDE) está basado en el lenguaje de programación Processing, y arduino es programado en un lenguaje de programación llamado Wiring basado en el lenguaje C/C++ simplificado (No tiene todas las estructuras del lenguaje C/C++) de fácil aprendizaje. Siendo estos, algunos de los fines del porqué se realizó este proyecto y por qué se decidió hacer uso de esta plataforma respecto a otras.

➤ Arduino Uno Rev3

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 Mhz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g



Figura 15. Arduino Uno Rev3

Fuente: Arduino Uno Rev3 — Arduino (2020)

En la figura 15 se presenta el Arduino Uno Rev3 junto a sus especificaciones.

➤ Arduino Mega 2560 Rev3

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 Mhz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g



Figura 16. Arduino Mega 2560 Rev3

Fuente: Arduino Mega 2560 Rev3 (2020)

En la figura 16 se presenta el Arduino Mega 2560 Rev3 junto a sus especificaciones.

➤ Arduino Micro

Microcontroller	ATmega32U4
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Digital I/O Pins	20
PWM Channels	7
Analog Input Channels	12
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega32U4) of which 4 KB used by bootloader
SRAM	2.5 KB (ATmega32U4)
EEPROM	1 KB (ATmega32U4)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	48 mm
Width	18 mm
Weight	13 g

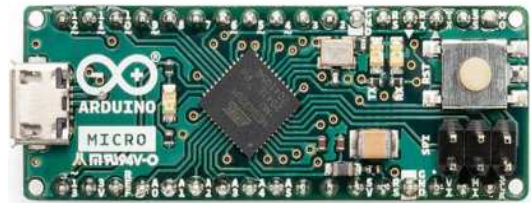


Figura 17. Arduino Micro

Fuente: Arduino Micro — Arduino Online (2020)

En la figura 17 se presenta el Arduino Micro junto a sus especificaciones.

➤ Arduino Leonardo

Microcontroller	ATmega32u4
Operating Voltage	5V
Input Voltage (Recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	20
PWM Channels	7
Analog Input Channels	12
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader
SRAM	2.5 KB (ATmega32u4)
EEPROM	1 KB (ATmega32u4)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.3 mm
Weight	20 g



Figura 18. Arduino Leonardo

Fuente: Arduino Leonardo with Headers (2020)

En la figura 18 se presenta el Arduino Leonardo junto a sus especificaciones.

2.2 COMUNICACIÓN SERIAL

También conocido como UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) o RS232, es una forma de comunicación entre dispositivos en los que se envían y reciben datos realizando un intercambio de una secuencia de bits, donde se transmite bit a bit, uno a la vez como se puede observar en la figura 19, aunque es lenta la comunicación se tiene la ventaja de que se puede transmitir a mayores distancias, y hacer uso de menos líneas de comunicación.

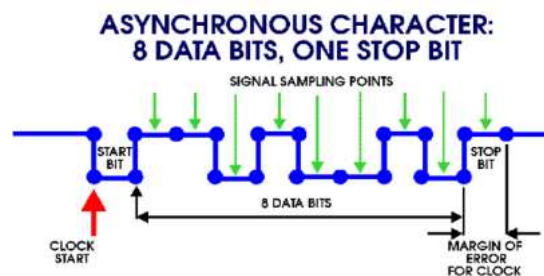


Figura 19. Comunicación serial

Fuente: Comunicación Serial con Arduino (2023)

La comunicación serial entre dos dispositivos utilizan 3 líneas que son las siguientes:

- Línea de recepción de datos (RX)
- Línea de transmisión de datos (TX)
- Línea común o tierra (GND)

que se pueden observar en la figura 20 cómo es su conexión.

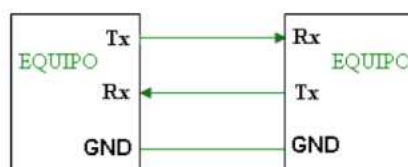


Figura 20. Conexión física comunicación serial

Fuente: Comunicación Serial con Arduino (2023)

Se usa este protocolo de comunicación para enlazar la plataforma Arduino con la PC.

2.3 BAUD RATE

Es la unidad que describe la velocidad de transmisión entre dos dispositivos electrónicos, significa que los datos entre los dispositivos tienen cierta velocidad de “X” cambios de señal por segundo, para no confundir con que se envía “X” bits por segundo, en la figura 21 se muestra el diagrama de tiempo.

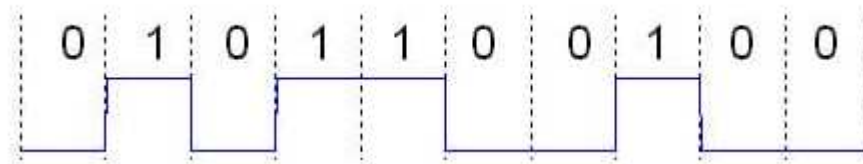


Figura 21. Diagrama de tiempo del baud rate

Fuente: What is the “baud” rate? - Tech Explorations (2008)

2.4 COMUNICACIÓN SPI

El bus de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) se utiliza para comunicar múltiples dispositivos esclavos a distancias cortas y a altas velocidades de hasta 10 Mbps, debido al aumento en la capacitancia impactando negativamente la calidad de conexión, la diferencia con los otros tipos de comunicación, es que hace uso de cuatro líneas de transmisión que son las siguientes:

- MOSI: Conocido como Master Output, Slave Input, es la línea de transmisión que va del maestro al esclavo.
- MISO: Conocido como Master Input, Slave Output, es la línea de transmisión que va del esclavo al maestro.
- SCK: Conocido como Serial Clock, son los pulsos que sincronizan la transmisión de los datos generados por el maestro.
- SS: Conocido como Slave Select, selecciona a un esclavo en particular para indicarle que se active, con un estado lógico bajo

El bus de comunicación SPI es un bus de comunicación full-duplex, es decir que permite que la comunicación sea hacia y desde el dispositivo maestro con el esclavo de manera simultánea.

En la figura 22 se muestra la conexión paralela, para usar varios dispositivos con el protocolo SPI, es necesario varios pines de Slave Select y solo un pin MOSI y MISO que se conectan en paralelo, que es la manera correcta de conectar varios esclavos.

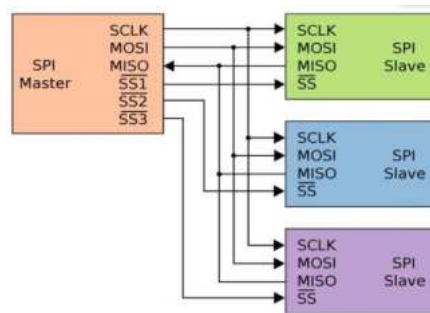


Figura 22. Conexión en paralelo SPI

Fuente: ¿Cómo funciona el protocolo SPI? - Panama Hitek (2014)

Por otro lado, en la figura 23, que es el tipo serie se utiliza un solo pin MOSI, MISO y SS, donde el MOSI de cada esclavo va conectado al MISO del esclavo anterior y el SS se conecta en paralelo, siendo esta la manera menos correcta de conectarlos varios esclavos, pero es funcional.

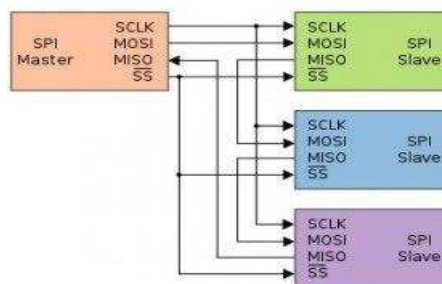


Figura 23. Conexión serie SPI

Fuente: ¿Cómo funciona el protocolo SPI? - Panama Hitek (2014)

Las ventajas de este protocolo es su velocidad puesto que es mayor a la del I2C y UART, y tiene comunicación full-duplex y múltiples esclavos.

Las desventajas de este protocolo es que requiere más pines que el bus I2C y UART, solo soporta un maestro y requiere un SS independiente para cada esclavo y obviamente que no se usa en distancias de transmisión largas.

Por lo que no presenta desventajas para este proyecto debido a que solo se usa un dispositivo con conexión SPI como esclavo, la cantidad de pines usados de igual manera no es problema y la distancia de transmisión no es larga.

Se usa este protocolo de comunicación para comunicar la plataforma Arduino con el circuito integrado MAX7219.

2.5 COMUNICACIÓN I2C

El protocolo I2C (por sus siglas en inglés Inter-Integrated Circuit) o también conocido Two Wire Interface, fue desarrollado para facilitar la interconexión de dispositivos electrónicos de alta velocidad como baja velocidad, como sensores, memorias, pantallas LCD, microcontroladores y circuitos integrados. El protocolo I2C se basa en dos líneas bidireccionales: una línea de datos serial (SDA) y una línea de reloj (SCL). Cada dispositivo conectado al bus I2C tiene una dirección única que le permite ser identificado por el maestro, que es el dispositivo que inicia y controla la comunicación. El maestro puede enviar o recibir datos de uno o varios esclavos, que son los dispositivos que responden a las órdenes del maestro. El protocolo I2C permite la comunicación multimaster y multi esclavo, es decir, que puede haber más de un:

- Maestro: Cada maestro es el encargado de iniciar, coordinar y controlar la comunicación con más de un esclavo.
- Esclavo: Son los dispositivos que están a la espera de que el maestro se comunique con ellos para enviar o recibir datos.

En la figura 24 se muestra la conexión necesaria para usar varios dispositivos con el protocolo I2C.

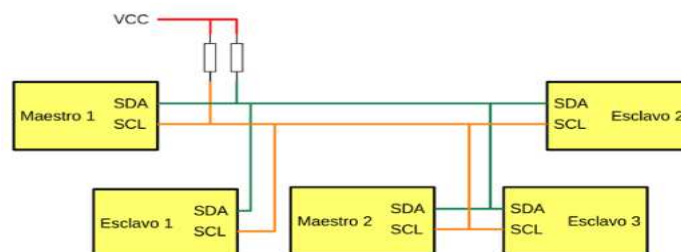


Figura 24. Diagrama conexión física comunicación I2C

Fuente: Comunicación I2C con Arduino lo mejor de 2 mundos (2020)

Siendo necesario solo dos pines para la comunicación con todos los dispositivos esclavos y maestros debido a que se conectan a las mismas líneas de transmisión.

Cabe destacar que se necesita de dos resistencias pull-up (Estado lógico alto) ubicados en los pines SDA y SCL ya que el bus de I2C es de colector abierto (Su salida siempre es un estado lógico bajo) y los valores de las resistencias varían según la velocidad que se requiere, como por ejemplo: velocidad Estándar (hasta 100 kbit/s) requiere de un resistor de 10k ohms, velocidad rápida (hasta 400 kbit/s) requiere de un resistor de 2k ohms, rápido plus (hasta 1 Mbit/s) y alta velocidad (hasta 3.4 Mbit/s) requieren resistores menores a 2k ohms.

Las ventajas de este protocolo como se observa es el poder comunicarse con varios esclavos con alta velocidad, pero algunas de sus desventajas es que no está diseñado para transmisión a largas distancias, necesita resistencias pull-up y todos los dispositivos que se comunican necesitan trabajar con el mismo voltaje.

Por lo tanto, la desventaja de las largas distancias y dispositivos que usen el mismo voltaje de trabajo no es impedimento en este proyecto, debido a que no es necesario hacer uso de transmisión a largas distancias y todos los dispositivos que se usan trabajan con el mismo voltaje, y por último el añadir dos resistencias pull-up no es nada complicado de implementar.

Se usa este protocolo de comunicación para comunicar la plataforma Arduino con las pantallas LCD y el circuito integrado MCP23017. Pero para identificar la dirección específica del módulo se utiliza un sketch de prueba creado por Arduino, llamado: I2C Scanner, el cual permite identificar la dirección I2C del dispositivo conectado a Arduino.

Por lo tanto, se usa el protocolo I2C porque no se requiere de gran velocidad de escritura o lectura debido a que no se envía cantidades enormes de información a la pantalla LCD y al circuito integrado MCP23017, y porque cada dispositivo es independiente a pesar de que se requieren solamente dos líneas de transmisión.

Mientras que se usa el protocolo SPI porque se requiere de gran velocidad de escritura y lectura de memoria debido a que se envía cantidades enormes de información en tiempo real al circuito integrado MAX7219 para mostrar en los displays de 7 segmentos, y porque solo tiene un protocolo SPI.

Por todos los puntos anteriores el protocolo I2C es ampliamente utilizado en la industria electrónica, por su simplicidad, flexibilidad y bajo costo.

2.6 COMUNICACIÓN USB HID

El USB (Bus Universal en Serie): Es un bus de comunicaciones que consiguió unificar todos los conectores y protocolos usados en un bus para conectarse, comunicarse entre periféricos (teclados, ratones, etc) y proveer de alimentación eléctrica. Reemplazando a la comunicación serial, paralela, PS2, etc.

El USB se convirtió en un estándar de comunicación para todo tipo de dispositivos que quiera conectarse a la computadora, sin necesidad de drivers o configuraciones adicionales, las ventajas del porqué se adoptó este bus de comunicación son las siguientes:

- Configuración automática
- Fácil de manipular
- Conexión simple
- No requiere de alimentación externa
- Velocidades extremadamente altas de hasta 5 Gbits/s
- Capacidad de conectar hasta 127 dispositivos en un solo ordenador
- Bajo costo de diseño e implementación
- Se mantiene en constante actualización

El bus de comunicación USB requiere solo 4 hilos de comunicaciones y se observan en la figura 25.

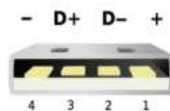


Figura 25. Diagrama de pines comunicación USB

Fuente: USB-A and USB-B connector pinout viewed from the front (2016)

- D+ y D-
Son los pines por los cuales se transmite toda la información.
- Vcc y Gnd
Son los pines por los cuales se alimenta al periférico.

Los dispositivos USB se clasifican según su velocidad de transferencia de datos:

- Baja velocidad (versión 1.0): Su tasa de transferencia es de hasta 1,5 Mbit/s.
- Velocidad completa (versión 1.1): Su tasa de transferencia es de hasta 12 Mbit/s.
- Alta velocidad (versión 2.0): Su tasa de transferencia es de hasta 280 Mbit/s.
- Velocidad super alta (versión 3.0): Su tasa de transferencia es de hasta 4,8 Gbit/s.
- Velocidad super alta+ (versión 3.1): Su tasa de transferencia es de hasta 10 Gbit/s.
- Velocidad super alta+ (versión 3.2): Su tasa de transferencia es de hasta 20 Gbit/s.

También existen diferentes tipos de conectores USB, que se muestran en la figura 26.

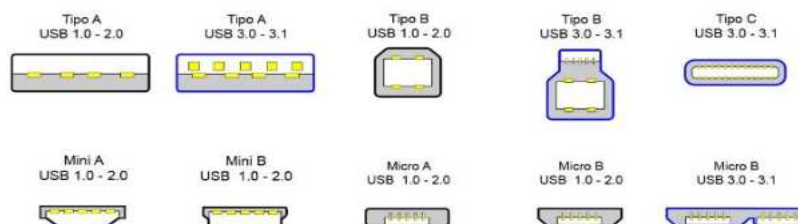


Figura 26. Tipos de conectores USB

Fuente: Tipos de USB: estándares, conectores y características de cada uno (2016)

La diferencia entre cada uno aparte del conector es que varían las velocidades dependiendo de la versión de USB que utilizan.

- HID (Human Interface Device): Es un tipo de interfaz de usuario para computadores que interactúa directamente con acciones físicas provenientes de

los seres humanos, y pueden entregar de igual manera una salida a los seres humanos.

Los dispositivos HID más comunes son los siguientes:

- Teclado.
- Ratón, trackball o touchpad.
- Tableta gráfica.
- Joystick o mando de juego.

En este proyecto se hace uso del USB-HID para manipular un dispositivo joystick, así logrando usarlo con Microsoft Flight Simulator 2020.

1. Joystick o mando de juego: El joystick es un periférico de entradas analógicas y digitales, en el que a cada entrada analógica y digital se le puede asignar una función o varias funciones en específico. Su gran ventaja es el poder ser adaptado para todo tipo de uso que se requiera en el video juego o simulador.

Se nombra a continuación algunos de los muchos ejemplos que existen del Joystick:

- Volantes de dirección.
- Pedales.
- Palancas de potencia.
- Tableros de accionamientos mediante botones.
- Compensadores.

Los ejemplos que se acaban de mencionar serán los que se usan para este proyecto que en la introducción fueron previamente explicados.

La forma de conectar el USB-HID con la PC se muestra en la figura 27.

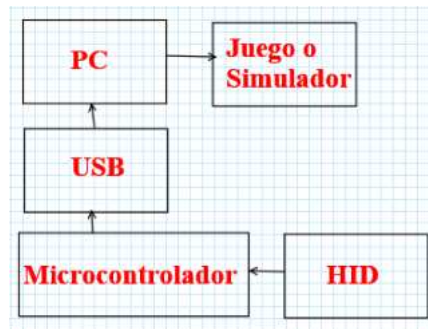


Figura 27. Diagrama de conexión USB-HID con la PC

Fuente: Elaboración propia (2023)

2.7 PULSADOR MOMENTÁNEO

Un pulsador momentáneo es un tipo de interruptor que permite el paso de la corriente eléctrica mientras se mantiene presionado. Se utiliza para controlar circuitos que requieren de una acción temporal, por ejemplo, como un timbre, prender un LED, etc. Un pulsador momentáneo está compuesto por dos contactos metálicos, uno fijo y otro móvil, que se unen o se separan mediante un resorte o un mecanismo de palanca. Cuando se presiona el pulsador, se cierra el circuito, permitiendo el paso de la corriente. Cuando se suelta el pulsador, se abre el circuito, interrumpiendo el paso de la corriente, en la figura 28 se puede observar los tipos de pulsadores momentáneos existentes.

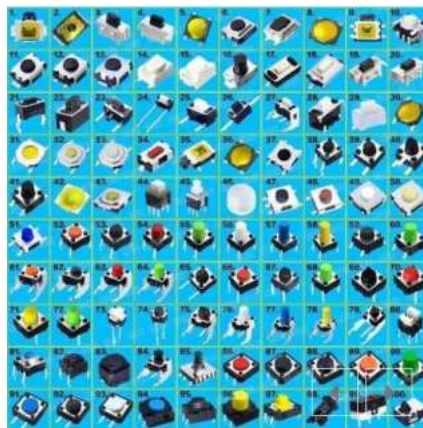


Figura 28. Tipos de pulsadores momentáneos

Fuente: Kit 100 X Pulsadores Varios Tamaños Y Modelos (2021)

Un pulsador momentáneo puede ser de dos tipos: normalmente abierto (NA) o normalmente cerrado (NC) como se observa en la figura 29. Un pulsador NA está abierto en su estado original y se cierra al presionarlo. Un pulsador NC está cerrado en su estado original y se abre al presionarlo.



Figura 29. Pulsador NA y NC

Fuente: Pulsador-areatecnologia.com (2021)

2.8 PANTALLA LCD 16X2 CON I2C

Una pantalla LCD (Liquid Crystal Display - Pantalla de Cristal Líquido) es un componente o dispositivo de salida que permite leer la información y mostrarla por pantalla. Para facilitar la comunicación y la conexión de la placa compatible con Arduino y la pantalla LCD, se emplea el módulo adaptador I2C "PCF8574," como se muestra en la figura 30.



Figura 30. Pantalla LCD 16x2 I2C

Fuente: Elaboración propia (2023)

2.9 CIRCUITO INTEGRADO MAX7219

El circuito integrado MAX7219 permite manipular una matriz LED de máximo 8x8 o bien un visualizador de 7 segmentos y 8 dígitos o 64 led independientes de cátodo común. La gran ventaja de este integrado es que puede ser encadenado, es decir que con solo 3 pines saliendo del microcontrolador al circuito integrado se pueden conectar hasta 8 MAX7219 haciendo uso de la comunicación SPI para comunicarse con el microcontrolador, ahorrando una cantidad enorme de pines. Para limitar el consumo de

energía y tener una protección, se requiere conectar una resistencia al MAX7219, que se calcula con la caída de voltaje que tiene cada led del 7 segmento y la corriente máxima que soporta, cabe mencionar que el brillo de cada 7 segmentos se lo hace mediante software, siendo la resistencia protección por si se sobrepasa algún valor máximo, luego de conocer esos dos datos, se requiere ir a la figura 31 para seleccionar la resistencia que estará en el orden de los kilos Ohms.

ISEG (mA)	V _{LED} (V)				
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
40	12.2	11.8	11.0	10.6	9.69
30	17.8	17.1	15.8	15.0	14.0
20	29.8	28.0	25.9	24.5	22.6
10	66.7	63.7	59.3	55.4	51.2

Figura 31. Selección resistencia ISET MAX7219

Fuente: max7219-max7221.pdf (1984)

Para una mayor estabilidad, el fabricante recomienda conectar un capacitor de 10uf entre V+ y GND para filtrar cualquier interferencia por la fuente de poder y una resistencia de 10k que puede ser pull-up o pull-down para no tener valores aleatorios en los 7 segmentos al iniciar el circuito integrado.

La conexión del circuito integrado MAX7219 con cualquier microcontrolador tiene que ser como se presenta en la figura 32.

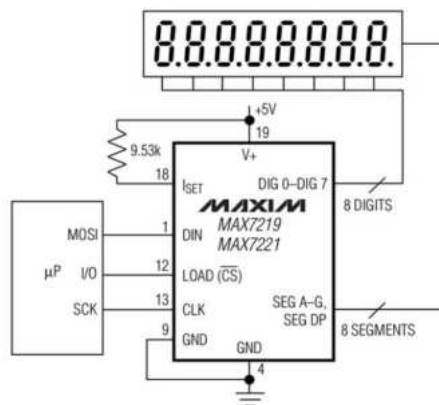


Figura 32. Diagrama de conexión MAX7219

Fuente: max7219-max7221.pdf (1984)

El circuito integrado MAX7219 para poder mostrar en todos los dígitos valores distintos hace uso de la técnica del:

- **Multiplexado:** Parte del propio ojo humano y la forma en cómo el cerebro procesa la información, al crear animaciones se hace uso del “número de fotogramas por segundos”, entonces al pasar cierta cantidad de fotogramas el ojo humano no distingue que son imágenes fijas sucesivas que se superponen a una velocidad muy rápida, por lo que se tomara ventaja de esto para poder mostrar distinta información en todos los dígitos del display de 7 segmentos al mismo tiempo de tal manera que cuando se prenda y apague rápidamente cada dígito produce esa ilusión de que está estático el valor que se muestra, aunque cambia cada milisegundo. En la figura 33, se muestra como es la conexión del multiplexado dentro del MAX7219 con los displays de 7 segmentos.

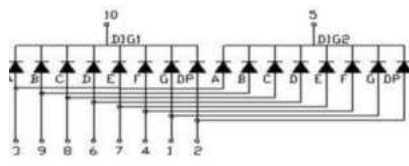


Figura 33. Conexión multiplexado entre el MAX7219 y los displays de 7 segmentos

Fuente: Ejemplo Básico Con IC MAX7219 (2016)

En la figura 34, se encuentra el diagrama de pines del MAX7219 y si se requiere saber la función de cada pin se encuentra en el Anexo A.

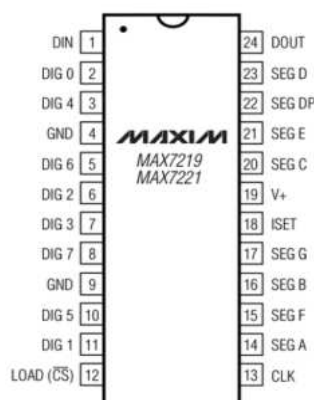


Figura 34. Diagrama de pines del MAX7219

Fuente: max7219-max7221.pdf (1984)

2.10 CIRCUITO INTEGRADO MCP23017

El circuito integrado MCP23017 es un expensor de E/S basado en la comunicación I2C, provee 16 GPIOs (General Purpose Input/Output o en español Entrada/Salida de uso General) es decir que tiene 16 pines de entrada o salida independientes, divididos en GPIO A y GPIO B. Se puede configurar su direccionamiento I2C de 7 bits (Address) para poder usar múltiples MCP23017 con solo 2 pines. La característica principal de este circuito integrado aparte de expandir 16 E/S es que cada GPIO tiene interrupción de entrada y una interrupción de salida INT A e INT B, que pueden trabajar como interrupciones individuales o se puede asignar la misma interrupción a ambos pines. Es decir que se lograra obtener 16 pines con interrupciones usando solo un pin de interrupción de Arduino.

En la figura 35 se encuentra el diagrama de pines del MCP23017 y si se requiere saber la función de cada pin se encuentra en el Anexo B.

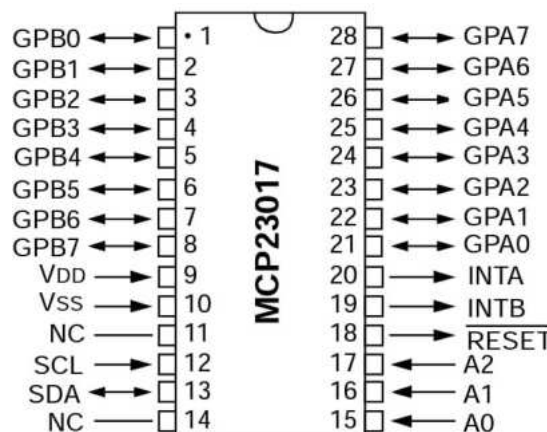


Figura 35. Diagrama de pines del IC MCP23017

Fuente: 20001952c.pdf (2001)

2.11 DISPLAY DE 7 SEGMENTOS Y 3 DÍGITOS

Un display de 7 segmentos de 3 dígitos no es más que un dispositivo de visualización para mostrar números decimales de forma electrónica. Cada segmento está hecho por un diodo emisor de luz (LED) que pueden ser de distintos colores. Los siete segmentos están dispuestos en un patrón específico, suelen estar etiquetados de la A a la G y el punto

decimal (DP) para formar los números del 0 al 9, así como algunas letras del abecedario y por último los dígitos están etiquetados del 1 al 3.

En un display de 7 segmentos de cátodo común, todos los cátodos de los LED están conectados entre sí. Para mostrar un número o letra, se debe aplicar un voltaje positivo a los ánodos de cada segmento, mientras que el cátodo común está conectado a tierra. Por lo tanto, este tipo de display 7 segmentos es más común que la de ánodo común, porque es más fácil controlar los LED.

En este proyecto se usaron los de 3 dígitos con cátodo común debido a que el IC MAX7219 maneja leds de cátodo común, en la figura 36 se muestra el diagrama de pines:

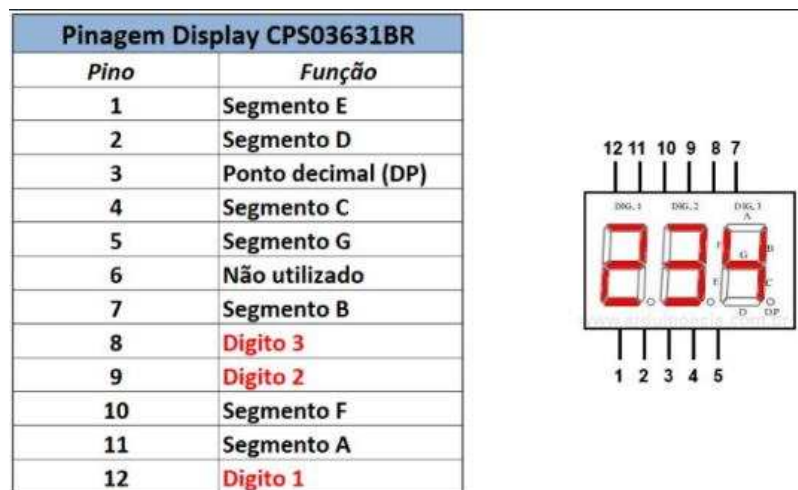


Figura 36. Diagrama de pines del display 7 segmentos y 3 dígitos

Fuente: Contador con display de 7 segmentos y 3 dígitos (2013)

2.12 ROTARY ENCODER

El rotary encoder es un tipo de sensor de posición, que convierte la posición angular(rotación) de una perilla en una señal de salida que puede ser usada para determinar a cuál dirección fue rotada la perilla. El rotary encoder puede rotar indefinidamente sin ningún tipo de interferencia mecánica y tiene una disposición de pines y componentes como en la figura 37.

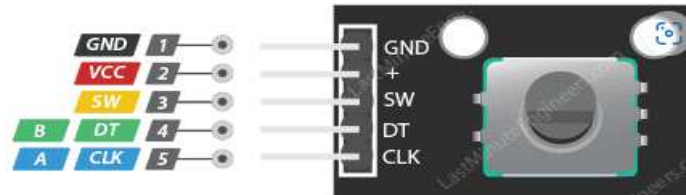


Figura 37. Rotary encoder

Fuente: In-Depth: How Rotary Encoder Works and Interface It with Arduino (2023)

La forma en que trabaja el rotary encoder es de la siguiente forma: internamente en el codificador hay un disco con agujeros, que están conectados al pin C, que es tierra o GND, también tiene dos pines de contacto A y B, como se muestra en la figura 38.

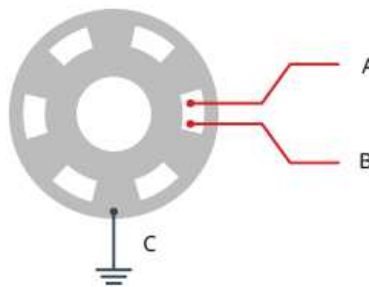


Figura 38. Conexión interna rotary encoder

Fuente: In-Depth: How Rotary Encoder Works and Interface It with Arduino (2023)

Cuando se rota la perilla los contactos A y B hacen contacto con tierra y dependiendo si A o B cruzan primero por tierra, se logra saber en qué dirección se ha rotado la perilla.

Cuando hacen contacto con tierra, dos señales cuadradas se generan, desfasadas en 90°.

Cuando la perilla gira a la derecha como en la figura 40, el pin A cruza primero con GND antes del pin B y si la perilla se gira a la izquierda como en la figura 39, el pin B cruza primero con GND antes del pin A

Observando los cambios de estado en los pines A y B, es posible determinar la dirección de rotación de la perilla.

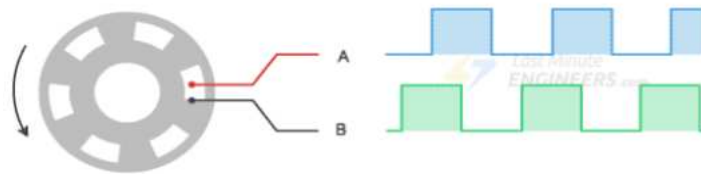


Figura 39. Rotación izquierda rotary encoder

Fuente: In-Depth: How Rotary Encoder Works and Interface It with Arduino (2023)

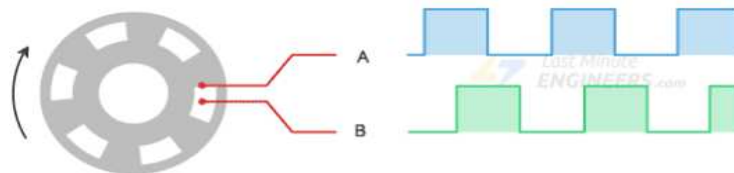


Figura 40. Rotación derecha rotary encoder

Fuente: In-Depth: How Rotary Encoder Works and Interface It with Arduino (2023)

2.13 PROGRAMA BITS AND DROIDS FLIGHT CONNECTOR

El programa Bits And Droids Flight Connector se encarga de enviar y recibir datos del Microsoft Flight Simulator 2020. Se puede hacer uso de cualquier microcontrolador capaz de recibir y enviar datos mediante puerto serial usando conexión USB, el logo del programa Bits and Droids Flight Connector se encuentra en la figura 41.

Y para hacer aún más sencilla la programación se puede hacer uso de su propia librería para Arduino, la librería contiene variables generales del simulador que se pueden usar y fue probada en las siguientes tarjetas:

- Arduino Uno
- Arduino Nano
- Arduino Leonardo
- Arduino Mega
- Esp32
- Esp8266

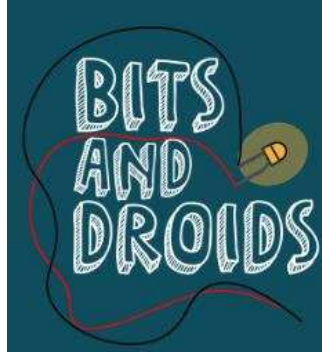


Figura 41. Logo Bits and Droids

Fuente: Arduino flight sim connector + library documentation - Bits and Droids (2021)

El programa Bits And Droids Flight Connector actúa como un túnel entre Arduino o cualquier otro microcontrolador y Microsoft Flight Simulator 2020, existen cientos de valores diferentes que se pueden enviar o recibir, por ejemplo, desde la velocidad hasta los frenos de velocidad, luces de navegación, frecuencias de radio navegación y mucho más.

Para entender cómo el programa maneja los datos, hace uso de prefijos para hacer más sencillo el entendimiento del código, debido a que detrás de cada prefijo existe un número natural o una cadena de texto asociado a cada dato. Debido a que, si se hiciera uso de cada número natural o cadena de texto, el código sería completamente inentendible para la gente externa al desarrollo de la aplicación.

Para acceder a las variables de Microsoft Flight Simulator 2020, se hace uso de dos librerías, SimConnect y WASM, siendo estas dos los eslabones para lograr toda la comunicación necesaria. La figura 42 aclara esta conexión:

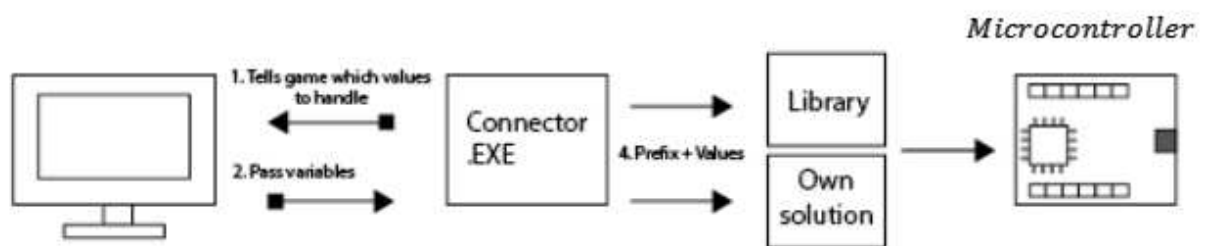


Figura 42. Diagrama de conexión de Bits and Droids Connector

Fuente: Arduino flight sim connector + library documentation - Bits and Droids (2021)

Una nota importante que nos deja el desarrollador es que es necesario el uso de un capacitor de 10uF entre GND y Reset si la placa la usaremos para recibir datos, debido a que la placa cada vez que recibe un dato se reinicia y eso es algo que no se requiere para este proyecto. Para subir un nuevo programa a la placa es necesario remover el capacitor y cuando se termine de subir el programa, volver a colocarlo.

2.14 IMPRESORA 3D

Es una máquina capaz de imprimir cualquier figura diseñada por un programa CAD (Computer-Aided Design) que en español sería diseño asistido por computadora. La figura debe tener volumen, es decir que tenga largo, ancho y alto.

La impresora 3D hace uso de diferentes tecnologías para fabricar el objeto, la más común es ir construyendo por capas sucesivas hasta conseguir el objeto deseado, siguiendo estos 3 pasos que se verán en la figura 43.

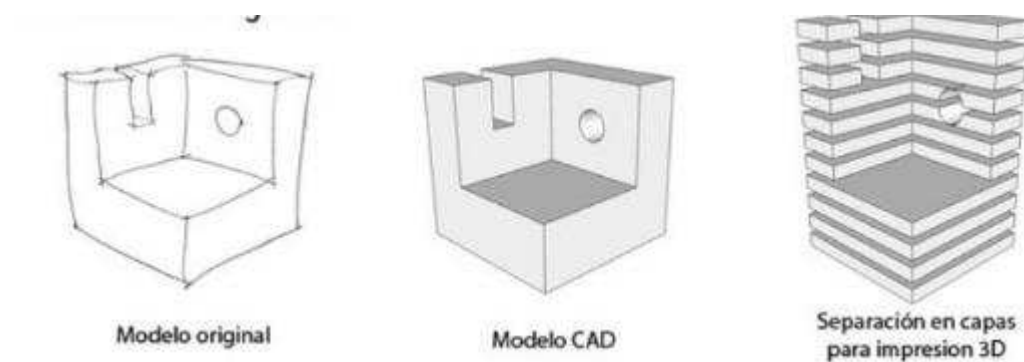


Figura 43. Secuencia de pasos para imprimir con impresora 3D

Fuente: Introducción, Marco Teorico, Impresora 3D (2023)

Se puede observar que el primer paso es el boceto en papel del objeto a querer imprimir, después se diseña en un modelo CAD y por último se hace la separación en capas para la impresión 3D.

Los materiales que se usa para la impresión 3D se centran en polímeros (Plásticos) y se clasifican en:

- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno): Es un plástico resistente, flexible y fácil de pintar.

- PLA (Poliácido Láctico): Es un plástico que es biodegradable, resistente pero difícil de pintar.
- Laybrick: Es una mezcla de plásticos y yesos para dar un aspecto de piedra, siendo fácil el pintado y lijado, pero con un coste más elevado que los anteriores materiales.
- Filaflex: Es una mezcla de poliuretano y otros materiales que permiten que tenga gran elasticidad, pero su impresión es lenta.

2.15 AUTODESK FUSION 360

Es un software que permite unificar el diseño, la ingeniería y la electrónica en una sola plataforma que se basa en la nube y da la ventaja de poder trabajar en colaboración con otras personas, por lo tanto, funciona en cualquier máquina, sea Mac o PC mientras tenga conexión USB para conectar la impresora 3D.

Para obtener una licencia de manera gratuita, se necesita tener una cuenta educativa y con esta cuenta nos otorgaran 3 años de uso sin limitantes sino el costo es de 70\$ mensual o de 545\$ anual.

El logo del programa Autodesk Fusion 360 se encuentra en la figura 44.



Figura 44. Logotipo Autodesk Fusion 360

Fuente: Fusion 360 (2023)

2.16 PROTEUS

Es un software que permite la simulación de circuitos electrónicos de todo tipo, siendo el software de simulación eléctrica y electrónica más popular del mundo por la increíble cantidad de librerías existentes ya en el paquete como en el internet, y se compone de las siguientes herramientas:

- ISIS: Es la herramienta para la elaboración de esquemáticos electrónicos con una librería de más de 6000 modelos.
- ARES: Es la herramienta para la elaboración de placas de circuitos impresos (PCB) con prestaciones como posicionamiento automático de elementos, generación automática de pistas y trabaja hasta con 16 capas, así minimizando la mano de obra y dándole gran parte del trabajo al PC.
- PROSPICE: Es la herramienta para la simulación de circuitos electrónicos que está basado en el estándar industrial SPICE3F5.
- VSM (Virtual System Modeling): Es la herramienta que permite incluir en el esquemático y simulación de circuitos electrónicos, el comportamiento completo de los microcontroladores más famosos en el mundo, como por ejemplo, la familia PIC, AVR, ARM, INTEL, etc. Pudiendo interactuar con todo el hardware y software de cada uno de los microcontroladores mencionados anteriormente.

Aparte hace simulación también de protocolos USB, I2C, RS232, etc. que trabajan en conjunto con los microcontroladores.

El logo del programa Proteus se encuentra en la figura 45.



Figura 45. Logotipo Proteus

Fuente: Gerber export from Proteus (2020)

2.17 PLACA PCB (PROTOTYPING CIRCUIT BOARD)

Es un componente esencial en la electrónica, es una placa que tiene en su superficie cobre, para poder conectar los componentes electrónicos mediante soldadura a las pistas dibujadas en el software.

En la figura 46 se puede observar cómo es la placa PCB nueva.



Figura 46. Placa PCB nueva

Fuente: sawers.com.bo (2023)

➤ Componentes de una PCB

- Sustrato: Es una capa de material dieléctrico para no interconectar una capa con otra.
- Pads (Agujeros) y Vias: Los pads son puntos de conexión para los componentes, pueden ser de tipo SMD o True hole.

Las vías son unos conductos que conectan las diferentes capas de la PCB.

- Pistas: Son caminos que se trazan en la superficie de cobre para conectar los componentes. En las pistas es muy importante tomar en cuenta la relación del grosor de las pistas y la capacidad de corriente que soportan, como se puede observar en la figura 47.

Ancho Pista	Corriente máxima
4mm	10A
2mm	5A
1,5mm	4A
1mm	3A
0,5mm	2A
0,2mm	0.5A (500mA)

Figura 47. Ancho pistas y corriente máxima

Fuente: Tema5-NormasBasicasyRecomendaciones (2015)

- Máscara de soldadura (Soldermask) y serigrafía (Silkscreen)

La máscara de soldadura su función es proteger las pistas y vías durante el proceso de soldadura.

La serigrafía se usa para identificar los componentes y tener referencias en la PCB.

- Capas: La placa PCB puede tener 1 o varias capas, y la elección de cuantas capas depende de la complejidad del diseño.

Todos los componentes mencionados anteriormente se pueden observar en la figura 48.

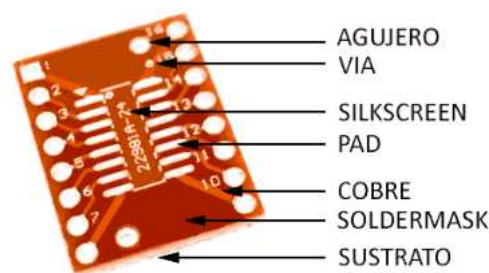


Figura 48. Componentes placa PCB

Fuente: Tutoriales de diseño de PCB. Partes de una PCB (2020)

- Fabricación PCB: Para la fabricación de PCB existen multitud de métodos, como el fresado CNC, método de planchado, fotolitografía, etc. Para la realización de las placas PCB de este proyecto se usaron los siguientes métodos:
- Método fresado CNC: La fresadora CNC lo que hace es desgastar y perforar la placa de cobre. Y de esa manera se logra tener la placa PCB terminada con sus respectivas vías, pads y pistas.
- Método de planchado: Lo que convierte a este método en el más popular, es su facilidad de implementación, ya que no requiere ningún equipo industrial especializado. Solo se necesitan elementos básicos como agua, una plancha, cloruro férrico, una impresora láser y papel fotográfico para obtener las vías, pads y pistas. El proceso se completa mediante la perforación manual o mediante el uso del método de fresado CNC.

CAPITULO 3

INGENIERÍA DEL PROYECTO

3.1 INTRODUCCIÓN

Se realiza el diseño de los circuitos electrónicos correspondientes del periférico mecánico modular y radio stack para ser utilizados con su debido software.

3.2 DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES A CUMPLIR

Se determina y explica de manera general las especificaciones que el proyecto debe cumplir antes de la selección de los sistemas, equipos o piezas. En la figura 49, 50 se tienen los diagramas de bloques de la conexión y de los componentes que constituyen la primera y segunda parte del proyecto.

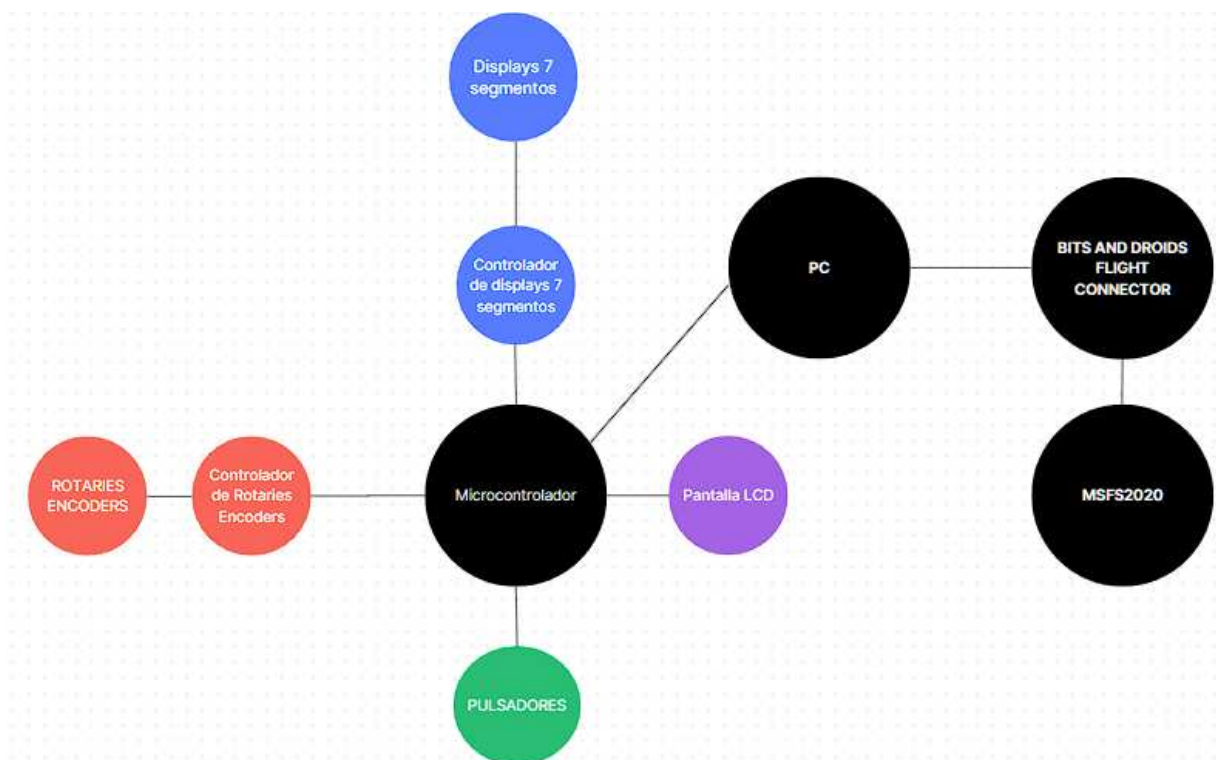


Figura 49. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la primera parte del proyecto

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se hace la explicación del funcionamiento general de los componentes que constituyen la primera parte del proyecto.

- Microcontrolador: La función es controlar y procesar la información de cada dispositivo de entrada y salida conectado a sus pines.
- Pantalla LCD: La función es mostrar la información que se recibe de manera gráfica, a continuación, se explica la clasificación de las pantallas LCD que se usaron en el proyecto:
- Controlador de displays 7 segmentos: Es el encargado controlar y de recibir la información que se quiere mostrar en los:
 - Displays 7 segmentos: Tiene como objetivo presentar de manera numérica la información recibida del controlador de displays 7 segmentos.
- Controlador de rotaries encoders: Es el encargado controlar y enviar al microcontrolador las señales mandadas por los:
 - Rotaries encoders: La función es decrementar el valor si se gira a la izquierda e incrementar el valor si se gira a la derecha de una variable a controlar.
- Pulsadores: Al ser presionado ejecuta una función específica.
- BITS AND DROID FLIGHT CONNECTOR: Es el software encargado de establecer la comunicación entre el Arduino Mega 2560 y el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020.
- MSFS2020: Es el simulador de vuelo que controlaremos y está encargado de recibir, enviar y manipular toda la información desde y para Bits And Droids Flight Connector.
- PC: Es el encargado de correr el software Bits And Droid Flight Connector y Microsoft Flight Simulator 2020. Su función es el permitir la comunicación física entre el software y Arduino.

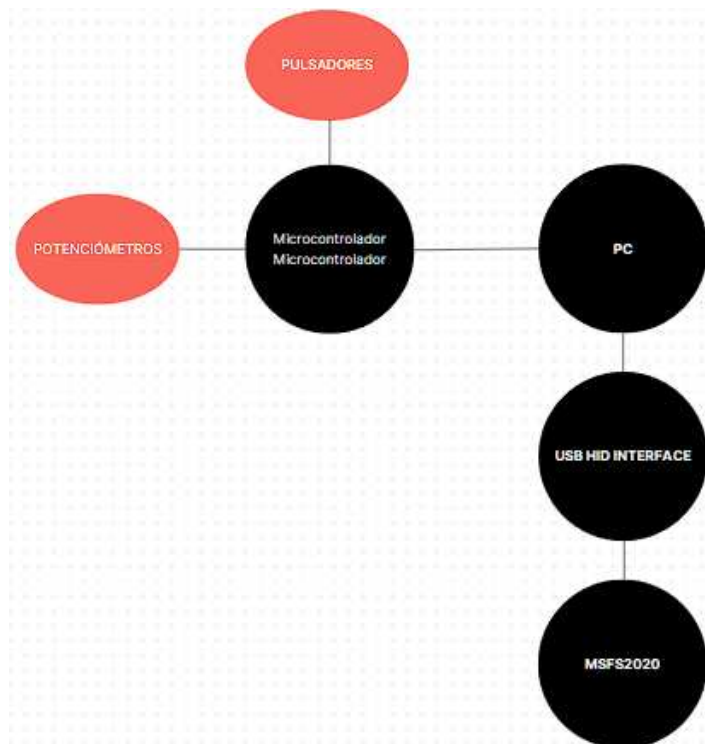


Figura 50. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la segunda parte del proyecto

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se hace la explicación del funcionamiento general de los componentes que constituyen la segunda parte del proyecto.





- Microcontrolador: La función es controlar y procesar la información de cada dispositivo de entrada y salida conectado a sus pines.
- Potenciómetros: La función de los potenciómetros es convertir los movimientos físicos en señales analógicas al girar su perilla con el mecanismo.
- Pulsadores: Al ser presionado ejecuta una función específica.
- MSFS2020: Es el simulador de vuelo que se usó y está encargado de recibir, enviar y manipular toda la información desde el Arduino.
- PC: Es el encargado de correr Microsoft Flight Simulator 2020. Su función es el permitir la comunicación física entre el software y Arduino.
- USB HID INTERFACE: Permite que el Arduino sea reconocido como un mando de juegos para usarlo en MFS2020 mediante la comunicación USB.

3.3 IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS COMERCIALES DE SISTEMAS, EQUIPOS O PIEZAS

Es crucial llevar a cabo un análisis detallado de las opciones disponibles en el mercado. Por lo que se requiere evaluar las características, ventajas, desventajas y aspectos económicos de cada alternativa, lo que permitirá tomar decisiones correctas para satisfacer las necesidades específicas del proyecto.

En la tabla 1 se tiene un resumen de las características de los Arduinos que se podrían usar en el proyecto.

Tabla 1. Resumen características de los Arduinos

Nombre del módulo	Arduino Micro	Arduino Uno Rev3	Arduino Leonardo	Arduino Mega2560 Rev3
				
Numero del elemento	A000053	A000066	A000057	A000067
Microcontrolador	ATmega32u4	ATmega328	ATmega32u4	ATmega2560
Frecuencia [Mhz]	16	16	16	16
Interfaz	UART TTL (5V)	USB & UART TTL (5V)	USB & UART TTL (5V)	USB & UART TTL (5V) - 4 UARTS
Voltaje de operación	5	5	5	5
Voltaje de entrada maximo - recomendado [V]	12	12	12	12
Voltaje de entrada minimo - recomendado [V]	7	7	7	7
Opciones de alimentación	USB/ Ext (Auto)	USB/ Ext (Auto)	USB/ Ext (Auto)	USB/ Ext (Auto)
GPIO (PWM)	20 (7)	20 (6)	20 (7)	70 (15)
Entradas analog	12	6	12	16
Salidas analog	0	0	0	0
Memoria flash [kB]	32	32	32	256
SRAM [kB]	2	2	2	8
Puertos USB	Micro Type B	B	Micro Type B	B/A
Longitud [mm]	48	69	69	102
Ancho [mm]	18	53	53	54
Peso [g]	13	25	20	35
Compatibilidad con shields	No se utilizan shields para esta placa	Perfecta - trabaja con mayoría de placas	Buena - algunas diferencias en pinouts	Buena - algunas diferencias en pinouts
Otras características			Ciente de USB	
Soporte de comunicación inalámbrica	Sin soporte	Sin soporte	Sin soporte	Sin soporte
Recomendación Solectroshop	Perfecta para prototipos de pequeños dispositivos	Una buena y potente base para empezar con Arduino	Una mejora de Arduino uno con nuevo microcontrolador y un convertidor USB menos	La más avanzada placa de está comparación - mucha flexibilidad y potencia combinada con alta compatibilidad

Fuente: Elaboración propia (2024)

3.4 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Los criterios de evaluación para la primera parte del proyecto son los siguientes.

1. # Pines de E/S digitales
2. # Pines de E/S analógicos
3. Voltaje de operación
4. Memoria flash

5. Precio
6. Expansibilidad
7. Compatibilidad con Bits and Droids Flight Connector
8. Facilidad en la Programación
9. Facilidad en el conectado con otros dispositivos electrónicos
10. Disponibilidad
11. Acabado físico
12. Acabado electrónico
13. Robustez
14. Información disponible
15. Librerías disponibles
16. Protocolo de comunicación
17. Grado de asimilación

Los criterios de evaluación para la segunda parte del proyecto son los siguientes:

1. # Pines de E/S digitales
2. # Pines de E/S analógicos
3. Voltaje de operación
4. Memoria flash
5. Precio
6. Expansibilidad
7. Facilidad en la Programación
8. Facilidad en el conectado con otros dispositivos electrónicos
9. Disponibilidad
10. Acabado físico
11. Acabado electrónico
12. Robustez
13. Información disponible
14. Librerías disponibles
15. Compatibilidad con USB HID
16. Protocolo de comunicación
17. Fácil aprendizaje

3.5 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ÓPTIMAS

La mejor opción de entre todas las alternativas de equipos analizadas para el uso en radio stack, es el “Arduino Mega 2560 Rev3”, debido a que cumple con los requerimientos mínimos del proyecto, ver tabla 2.

Tabla 2. Requerimiento del radio stack

Requerimiento	Cumplimiento
23 E/S totales entre digitales y analógicas	Sí (70 E/S) a diferencia del Arduino Uno (20 E/S)
Posibilidad de expansión futura sin necesidad de expansores de E/S	Sí
Complejidad de programación	Baja
Complejidad electrónica y física	Baja
Uso de expansores de E/S en caso de requerir más de 70 E/S	Posible

Fuente: Elaboración propia (2024)

Pasando por desapercibidas las demás características técnicas de las placas Arduino como, por ejemplo: Capacidad de memoria, protocolos de comunicación, voltaje de funcionamiento, etc.

Entre todas las alternativas de equipos analizadas para el uso en el periférico modular, se tuvo que ser un poco más minucioso con la selección de la mejor opción, porque el Arduino Leonardo y Arduino Micro tienen las mismas características electrónicas y ambos cumplen con los requerimientos mínimos del proyecto, ver tabla 3.

Tabla 3. Requerimiento del módulo periférico mecánico modular

Requerimiento	Cumplimiento
12 E/S totales entre digitales y analógicas	Sí (20 E/S)
Posibilidad de expansión futura sin necesidad de expansores de E/S	Sí
Robustez en acabado electrónico y físico	Sí (Similar al Arduino Uno Rev3)
Manipulación delicada y cuidadosa	No (a diferencia del Arduino Micro)

Fuente: Elaboración propia (2024)

Pero la característica que hizo que, de los dos, el Arduino Leonardo sea la mejor opción, es su robustez, acabado electrónico y físico, mientras que el Arduino Micro al ser de tamaño reducido, requiere de una manipulación más delicada y cuidadosa.

Posterior a la cuidadosa selección de los sistemas, equipos o piezas, en la figura 51, 52 se presentan respectivamente las figuras 48,49 desarrolladas a más detalle.

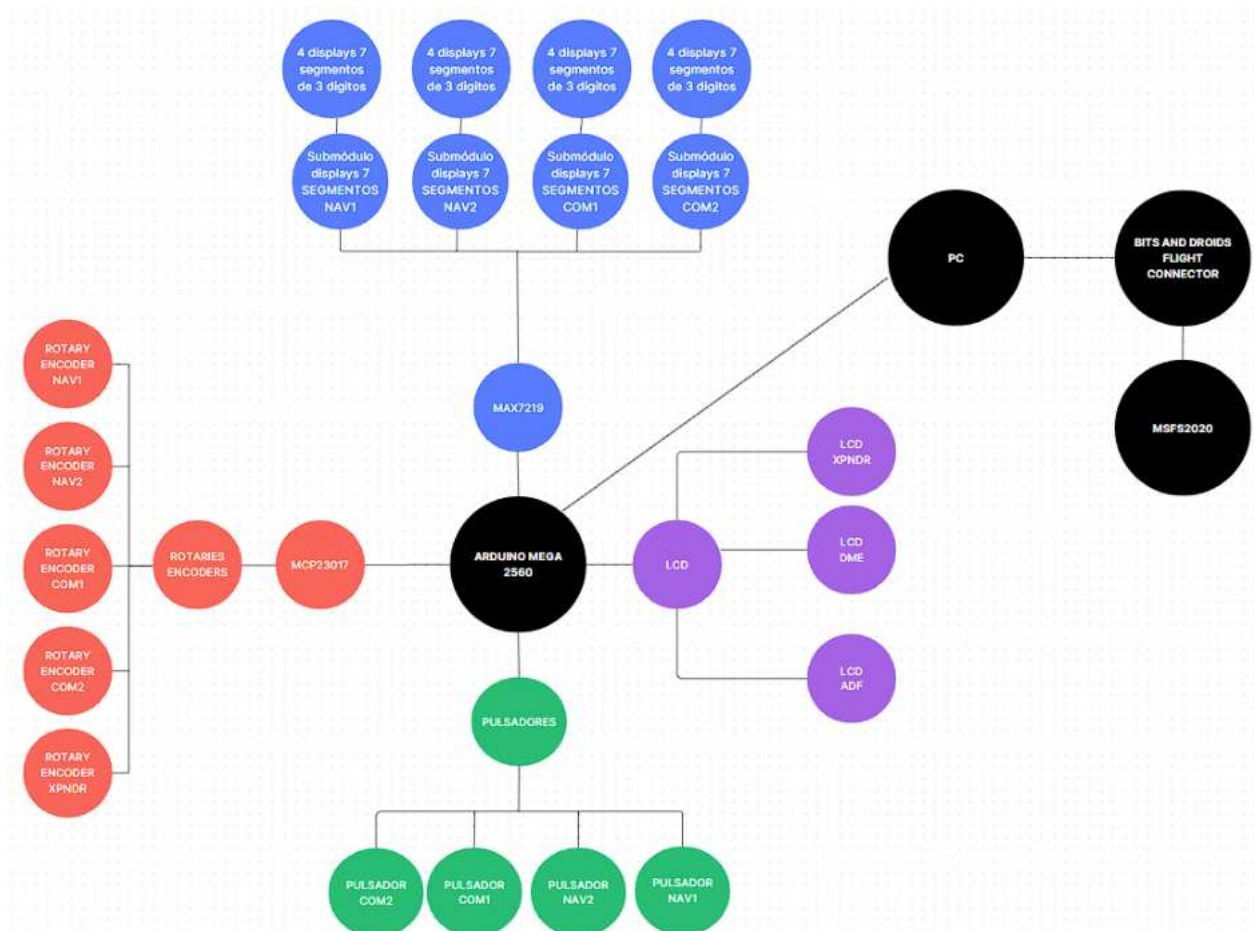


Figura 51. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la primera parte del proyecto finalizada la selección de sistemas, equipos o piezas

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se hace la explicación detallada del funcionamiento de cada componente que constituye la primera parte del proyecto.

- **Arduino Mega 2560:** La función del Arduino Mega 2560 es controlar y procesar la información de cada dispositivo de entrada y salida conectado a sus pines.
- **LCD:** La función es mostrar la información que se recibe de manera gráfica, a continuación, se explica la clasificación de las pantallas LCD que se usaron en el proyecto:
 - **LCD XPNDR:** Muestra el código transpondedor de la aeronave.
 - **LCD DME:** Muestra la distancia entre la aeronave y la estación VOR.

- LCD ADF: Muestra la frecuencia de la radioemisora AM que se requiere encontrar.
- MAX7219: Es el encargado controlar y de recibir la información que se quiere mostrar en:
 - 4 displays 7 segmentos de 3 dígitos: Tiene como objetivo presentar de manera numérica la información recibida del MAX7219. A continuación, se detallan los submódulos que conforman los displays 7 segmentos de 3 dígitos utilizados en el proyecto:
 - Submódulo 7 segmentos NAV1: Muestra la frecuencia activa y de espera de NAV1.
 - Submódulo 7 segmentos NAV2: Muestra la frecuencia activa y de espera de NAV2.
 - Submódulo 7 segmentos COM1: Muestra la frecuencia activa y de espera de COM1.
 - Submódulo 7 segmentos COM2: Muestra la frecuencia activa y de espera de COM2.
- MCP23017: Es el encargado controlar a los:
 - Rotaries Encoder: La función es decrementar el valor si se gira a la izquierda e incrementar el valor si se gira a la derecha de una variable que controla, a continuación, se explica la clasificación de las Rotary Encoder que se usaron en el proyecto:
 - ROTARY ENCODER NAV1: Decrementa el valor si se gira a la izquierda e incrementa el valor si se gira a la derecha de NAV1 y al presionar el eje del rotary encoder se cambia de kHz a MHz.
 - ROTARY ENCODER NAV2: Decrementa el valor si se gira a la izquierda e incrementa el valor si se gira a la derecha de NAV2 y al presionar el eje del rotary encoder se cambia de kHz a MHz.

- ROTARY ENCODER COM1: Decrementa el valor si se gira a la izquierda e incrementa el valor si se gira a la derecha de COM1 y al presionar el eje del rotary encoder se cambia de kHz a MHz.
 - ROTARY ENCODER COM2: Decrementar el valor si se gira a la izquierda e incrementar el valor si se gira a la derecha de COM2 y al presionar el eje del rotary encoder se cambia de kHz a MHz.
 - ROTARY ENCODER XPNDR: Decrementa el valor si se gira a la izquierda e incrementa el valor si se gira a la derecha y al presionar el eje del rotary encoder se cambia al siguiente dígito del código transponder.
- Pulsadores: Al ser presionado ejecuta una función específica, a continuación, se explica la clasificación de los pulsadores que se usaron en el proyecto:
- PULSADOR NAV1: Cambia la frecuencia de espera a frecuencia activa de NAV1.
 - PULSADOR NAV2: Cambia la frecuencia de espera a frecuencia activa de NAV2.
 - PULSADOR COM1: Cambia la frecuencia de espera a frecuencia activa de COM1.
 - PULSADOR COM2: Cambia la frecuencia de espera a frecuencia activa de COM2.
- BITS AND DROID FLIGHT CONNECTOR: Es el software encargado de establecer la comunicación entre el Arduino Mega 2560 y el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020.
- MSFS2020: Es el simulador de vuelo que controlaremos y está encargado de recibir, enviar y manipular toda la información desde y para Bits And Droids Flight Connector.
- PC: Es el encargado de correr el software Bits And Droid Flight Connector y Microsoft Flight Simulator 2020. Su función es el permitir la comunicación física entre el software y Arduino.

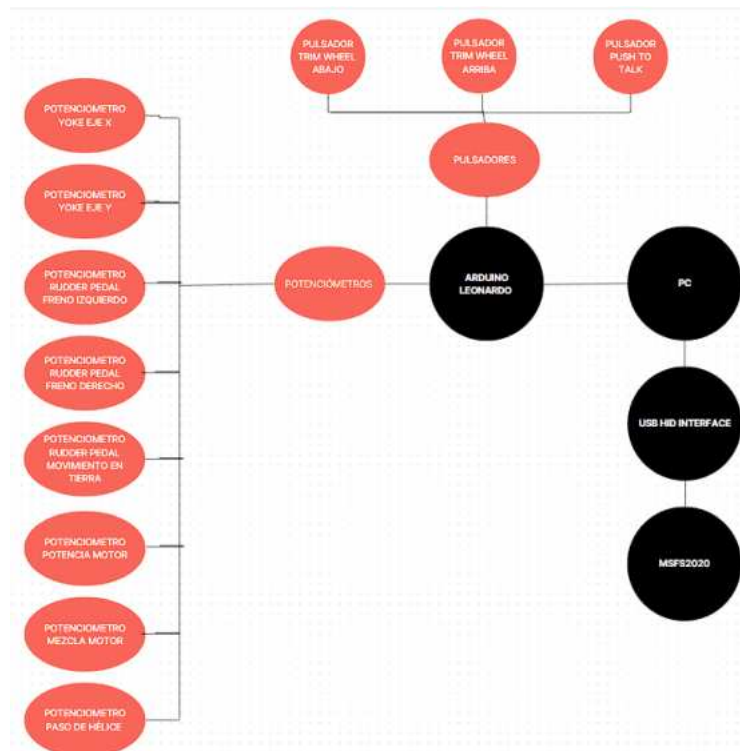


Figura 52. Diagrama de bloques de las especificaciones a cumplir de la segunda parte del proyecto finalizada la selección de sistemas, equipos o piezas

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se hace la explicación detallada del funcionamiento de cada componente que constituye la segunda parte del proyecto.

- Arduino Leonardo: La función del Arduino leonardo es controlar y procesar la información de cada dispositivo de entrada y salida conectado a sus pines.
- Potenciómetros: la función de los potenciómetros es convertir los movimientos físicos en señales analógicas al girar su perilla con el mecanismo. Los potenciómetros que se usaron en el proyecto:
 - POTENCIOMETRO YOKE EJE X, Y: Son los potenciómetros encargados del movimiento de ambos ejes del control de superficie vertical y horizontal.
 - POTENCIOMETRO RUDDER PEDAL FRENO IZQUIERDO Y DERECHO: Son los potenciómetros encargados de los frenos izquierda y derecha del avión.

- **POTENCIOMETRO RUDDER PEDAL MOVIMIENTO EN TIERRA:**
Son los potenciómetros encargados del movimiento en tierra del avión.
- **POTENCIOMETRO POTENCIA MOTOR:** Es el potenciómetro encargado de la potencia del motor del avión.
- **POTENCIOMETRO MEZCLA MOTOR:** Es el potenciómetro encargado de la mezcla de aire y combustible del motor.
- **POTENCIOMETRO PASO DE HÉLICE:** Es el potenciómetro encargado del paso de la hélice del avión.
- **Pulsadores:** Al ser presionado ejecuta una función específica, a continuación, se explica la clasificación de los pulsadores que se usaron en el proyecto:
 - **PULSADOR TRIM WHEEL ARRIBA:** Al presionar el pulsador, el compensador o trim wheel subirá el morro del avión.
 - **PULSADOR TRIM WHEEL ABAJO:** Al presionar el pulsador, el compensador o trim wheel bajará el morro del avión.
 - **PULSADOR PUSH TO TALK:** Al presionar el pulsador, se abre el micrófono para poder comunicarse con la torre de control.
- **MSFS2020:** Es el simulador de vuelo que se usó y está encargado de recibir, enviar y manipular toda la información desde el Arduino.
- **PC:** Es el encargado de correr Microsoft Flight Simulator 2020. Su función es el permitir la comunicación física entre el software y Arduino.
- **USB HID INTERFACE:** Permite que el Arduino sea reconocido como un mando de juegos para usarlo en MFS2020 mediante la comunicación USB.

3.6 DISEÑO DEL PROTOTIPO (HARDWARE Y SOFTWARE)

En este subtítulo, se procede a diseñar el hardware para los prototipos tanto del periférico mecánico modular como del radio stack. Esto se realizó mediante el uso del programa Proteus. Además, se llevará a cabo la programación de su correspondiente software utilizando el entorno Arduino IDE. Para una mejor organización y comprensión, este proceso se dividió en dos partes distintas.

3.6.1 Diseño prototipo del hardware del radio stack

Para evitar errores en la fase de diseño del prototipo del hardware del radio stack se decidió dividir el proceso en las siguientes secciones:

- Representación visual de los dispositivos utilizados en el radio stack.
- Selección de componentes electrónicos
- Diagramas circuitales y placas PCB

3.6.1.1 Representación visual de los dispositivos utilizados en el radio stack

En este apartado se presenta una representación visual detallada de los dispositivos esenciales que componen al radio stack. Esta representación permite identificar y comprender de manera clara y concisa los componentes involucrados, como se puede observar en la figura 53.

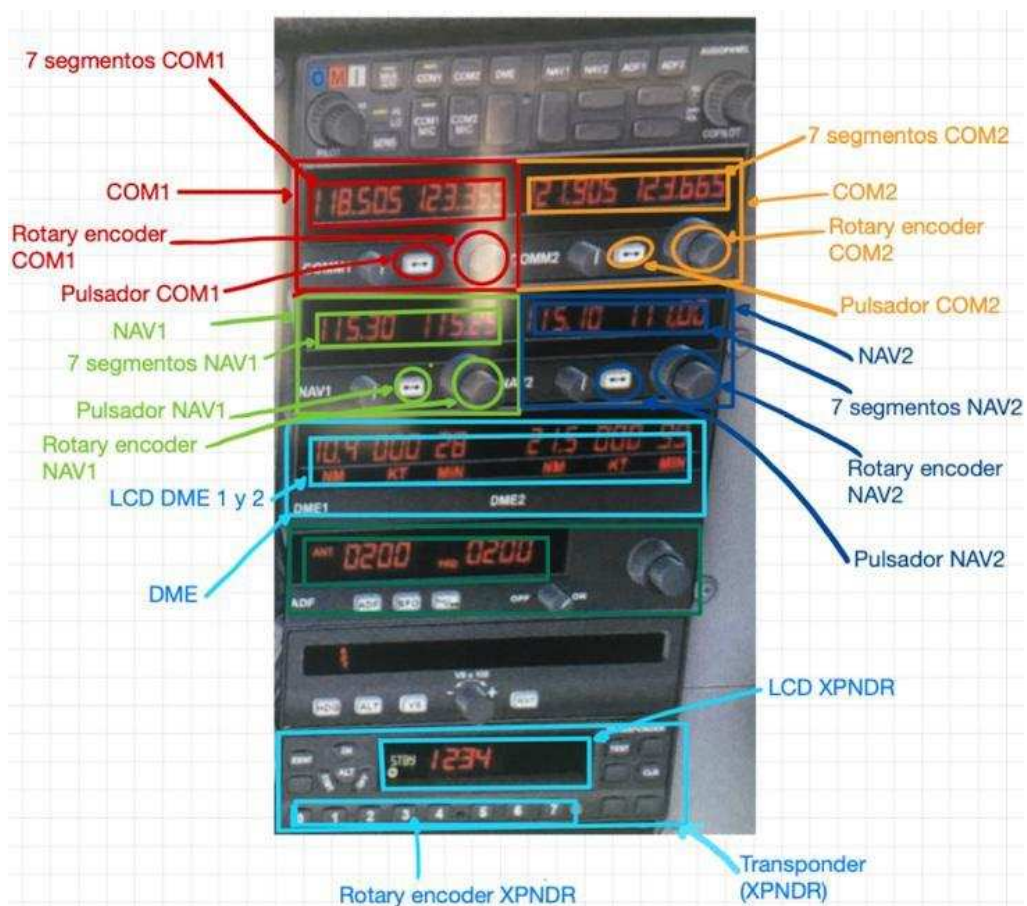


Figura 53. Representación visual del radio stack

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.1.2 Selección de componentes electrónicos

Al realizar un análisis de la representación visual de los dispositivos empleados en el radio stack, se logró identificar los componentes requeridos para su correcto funcionamiento. La lista detallada de estos componentes se encuentra en la Tabla 4.

Tabla 4. Componentes electrónicos para el radio stack

Componentes Electrónicos	Unidades
Display 7 segmentos de 3 dígitos	16
Rotary Encoder	6
Pulsadores	5
Pantallas LCD	3
MAX7219	8
MCP23017	1
Arduino Mega 2560 Rev 3	1
Shield Arduino Mega 2560 Rev 3	1
Placas PCB distintos tamaños	7
Cables distintos tamaños	1

Fuente: Elaboración propia (2024)

3.6.1.3 Diagramas circuitales y placas PCB

La primera parte del proyecto que consta del radio stack, se dividió en 5 submódulos para tener una mejor comprensión de los diagramas circuitales como se muestra a continuación:

1. Diagrama circuitual displays 7 segmentos COM y NAV

El diagrama circuitual display 7 segmentos se divide en dos diagramas circuitales, debido que al poner todos los componentes necesarios en un solo diagrama no se aprecia de manera clara las conexiones, el diagrama 1 y 2 son consecutivos. Se Se pueden apreciar respectivamente en las figuras 54 y 55 los displays 7 segmentos de COM 1 y 2, NAV 1 y 2.

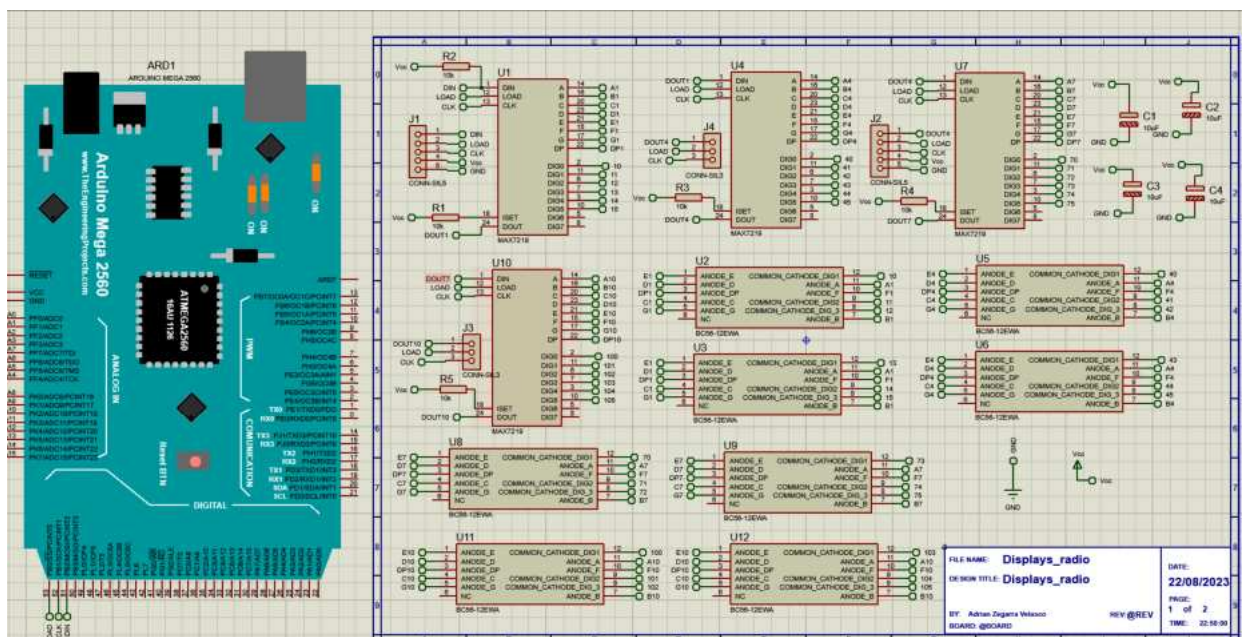


Figura 54. Diagrama circuitual displays 7 segmentos COM 1, 2 y NAV 1,2

Fuente: Elaboración propia (2023)

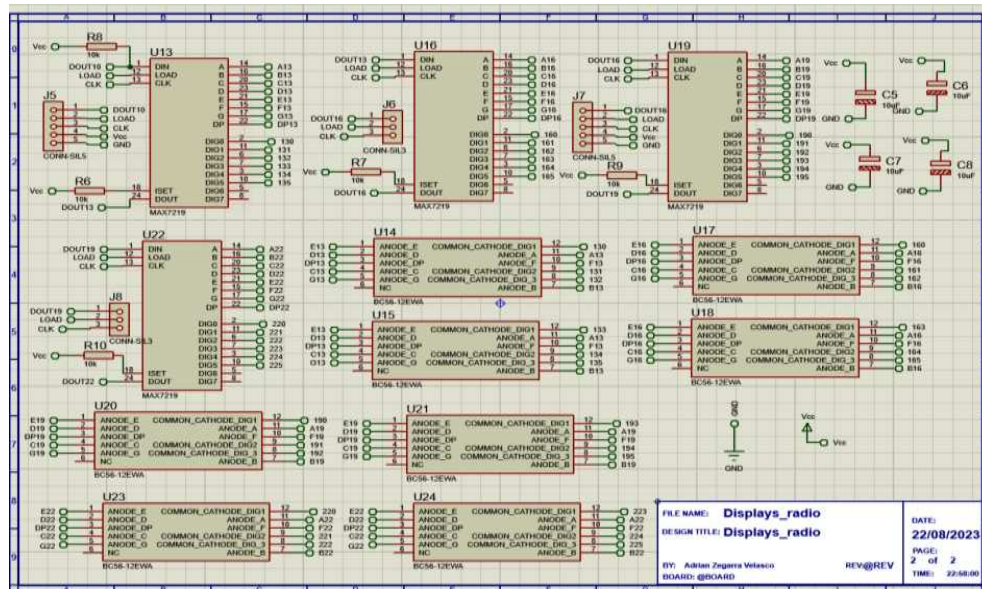


Figura 55. Diagrama circuital 2 de displays 7 segmentos

Fuente: Elaboración propia (2023)

Para la realización de la placa PCB se tomaron en cuenta los siguientes factores de diseño:

- Se hizo uso de una PCB de dos caras debido a que se tiene componentes con una cantidad grande de pines y conexiones, por tanto, el problema de choque entre pistas con distintas señales y que todos los componentes vayan a solo un lado de la placa se solucionan ya que entre las dos capas se hacen interconexiones de las pistas con las vías y como se tiene cobre en ambas caras es posible conectar componentes en una u otra.
- Dimensiones placa PCB: 94mm x 50mm.
- La ubicación de los componentes electrónicos es de vital importancia para el posterior diseño, en este caso se toma de referencia la ubicación como se encuentra en la figura 53.

Para lograr el diseño de la placa PCB a partir de los diagramas de conexión de las figuras 54 y 55, se hizo uso de la herramienta de autoruteado de Proteus, que sirve para que la PC de manera automática busque los mejores caminos para las pistas, pero no es perfecta y siempre deja algunos errores los cuales hay que solucionarlos manualmente.

El diseño final de la placa PCB se puede observar en la figura 56.

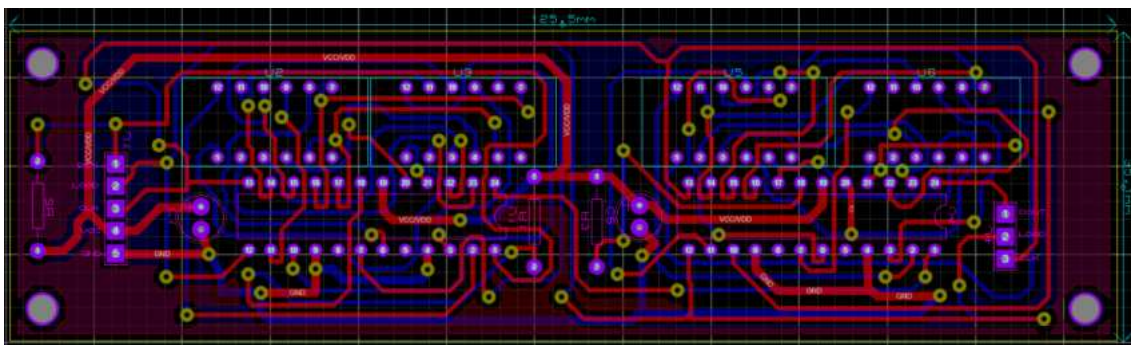


Figura 56. Diseño final placa PCB

Fuente: Elaboración propia (2023)

En la figura 57 y 58 se puede observar el modelo 3D de la placa PCB para tener una imagen más clara de cómo es el acabado en físico de ambas caras.

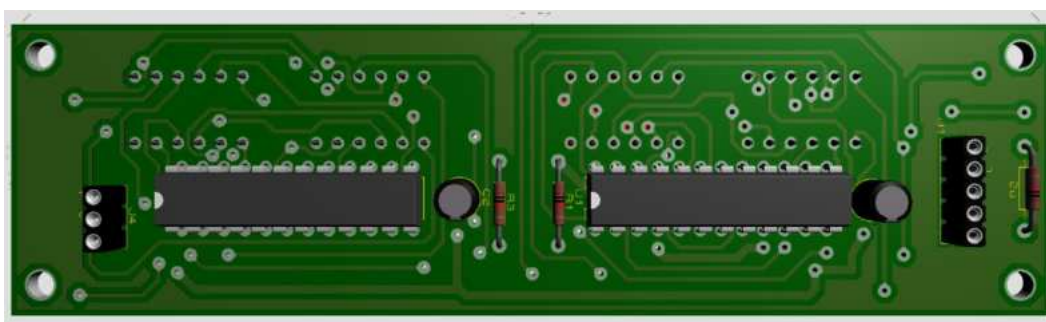


Figura 57. Diseño final placa PCB 3D cara anterior

Fuente: Elaboración propia (2023)

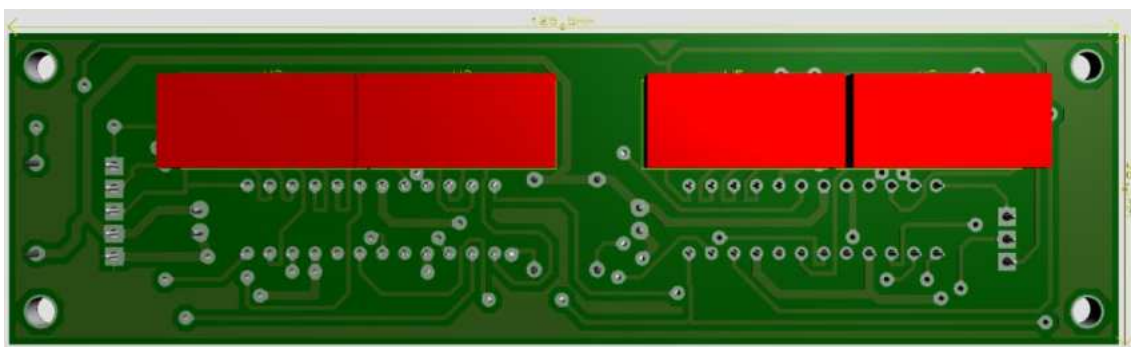


Figura 58. Diseño final placa PCB 3D cara posterior

Fuente: Elaboración propia (2023)

2. Diagrama circuital de botones y rotaries encoders COM y NAV

En la figura 59 se aprecia el diagrama circuital botones y rotaries encoders respectivos de COM 1 y 2, NAV 1 y 2.

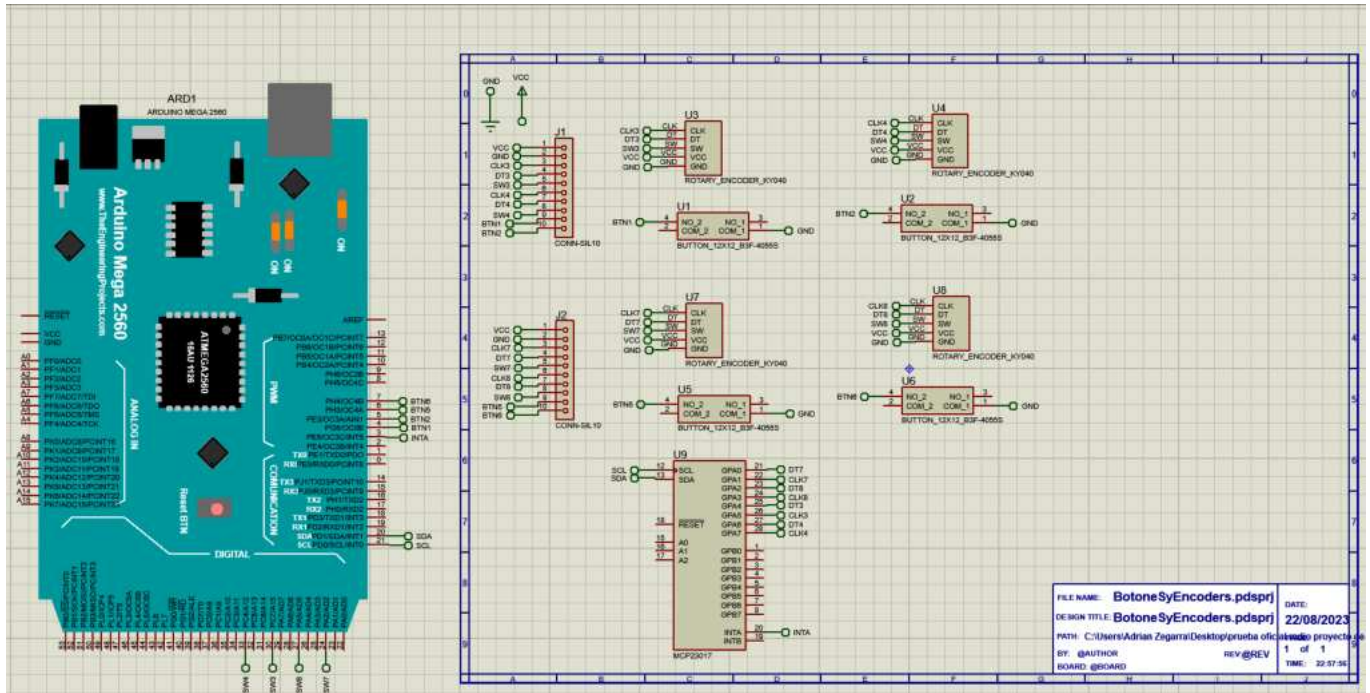


Figura 59. Diagrama circuital de botones y rotaries encoders

Fuente: Elaboración propia (2023)

Para crear la placa PCB, se consideraron los mismos factores que se aplicaron en las placas PCB utilizadas en el diagrama de los displays de 7 segmentos, con la única variación en dos aspectos clave:

- Dimensiones placa PCB: 125.5mm x 50mm
- Se hizo uso de una PCB de una cara debido a que no se tienen componentes con una cantidad grande de pines y conexiones entre sí.

El diseño final de la placa PCB se puede observar en la figura 60.

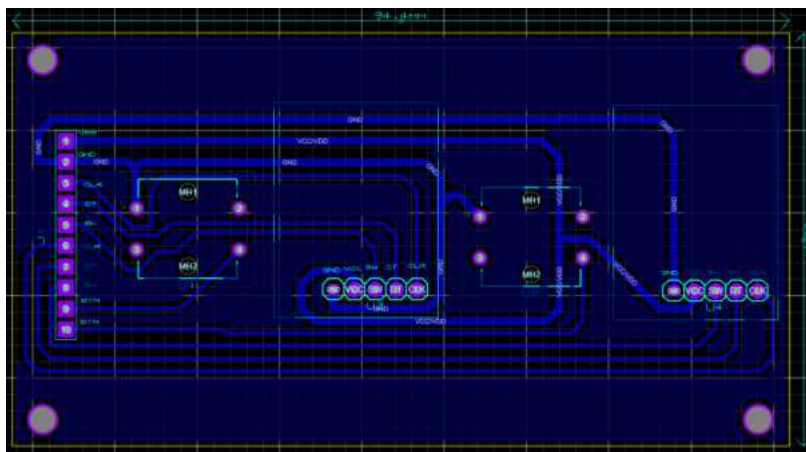


Figura 60. Diseño final placa PCB

Fuente: Elaboración propia (2023)

Y por último en la figura 61 se puede observar el modelo 3D de la placa PCB para tener una imagen más clara de cómo es el acabado en físico.

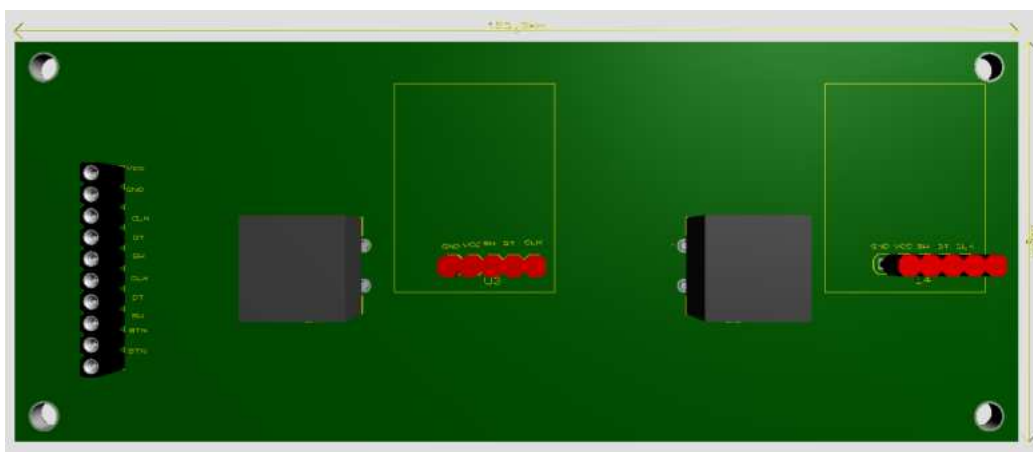


Figura 61. Diseño final placa PCB 3D

Fuente: Elaboración propia (2023)

3. Diagrama circuital Pantalla LCD del DME

En la figura 62 se aprecia el diagrama circuital pantalla LCD DME.

Cabe mencionar que este diagrama circuital no tendrá placa PCB ya que no es necesario porque solo se usa una pantalla LCD.

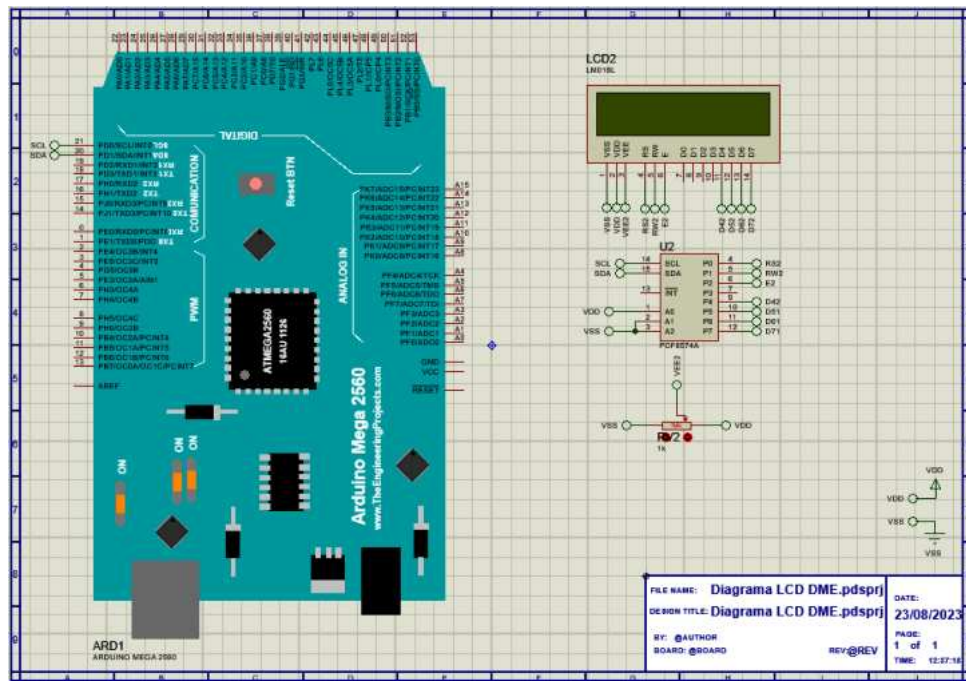


Figura 62. Diagrama circuital pantalla LCD DME

Fuente: Elaboración propia (2023)

4. Diagrama circuital pantalla LCD y rotary encoder del XPNDR

En la figura 63 se aprecia el diagrama circuital pantalla LCD, donde el circuito integrado MCP23017 (U3) es el mismo que se encuentra en la figura 59 pero se conecta el rotary encoder XPNDR en los pines GPBI0 y GPBI1.

Cabe mencionar que este diagrama circuital no tendrá placa PCB ya que no es necesario porque solo se usa una pantalla LCD y un rotary encoder.

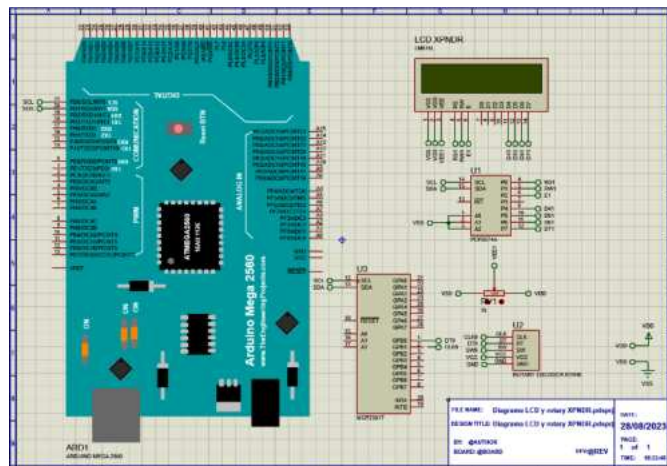


Figura 63. Diagrama circuital pantalla LCD y rotary encoder XPNDR

Fuente: Elaboración propia (2023)

5. Diagrama circuital pantalla LCD, rotary encoder y pulsador del ADF

En la figura 64 se aprecia el diagrama circuital, donde el circuito integrado MCP23017 (U3) es el mismo que se encuentra en la figura 63 y figura 59 pero se conecta el rotary encoder ADF en los pines GPB2 y GPB3.

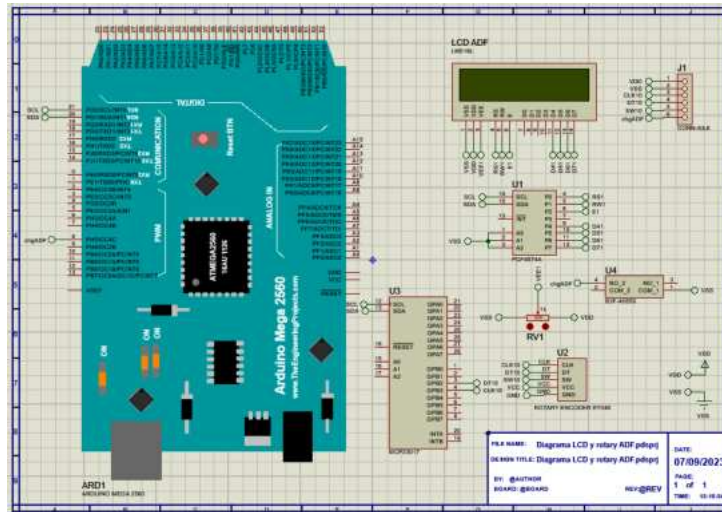


Figura 64. Diagrama circuital pantalla LCD, rotary encoder y pulsador ADF

Fuente: Elaboración propia (2023)

Para la realización de la placa PCB se tomaron en cuenta los mismos factores de las placas PCB del diagrama circuital displays 7 segmentos, cambiando unicamente los siguientes dos factores:

- Dimensiones placa PCB: 54.8mm x 29.6mm
- Se hizo uso de una PCB de una cara debido a que no se tienen componentes con una cantidad grande de pines y conexiones entre sí, por tanto, el problema de choque entre pistas no existe al ser un diseño sencillo, y que todos los componentes vayan a solo un lado de la placa no es un inconveniente, porque requerimos eso.

Para lograr el diseño de la placa PCB no se utilizó el autoruteado, todas las conexiones fueron hechas manualmente.

El diseño final de la placa PCB se puede observar en la figura 65.

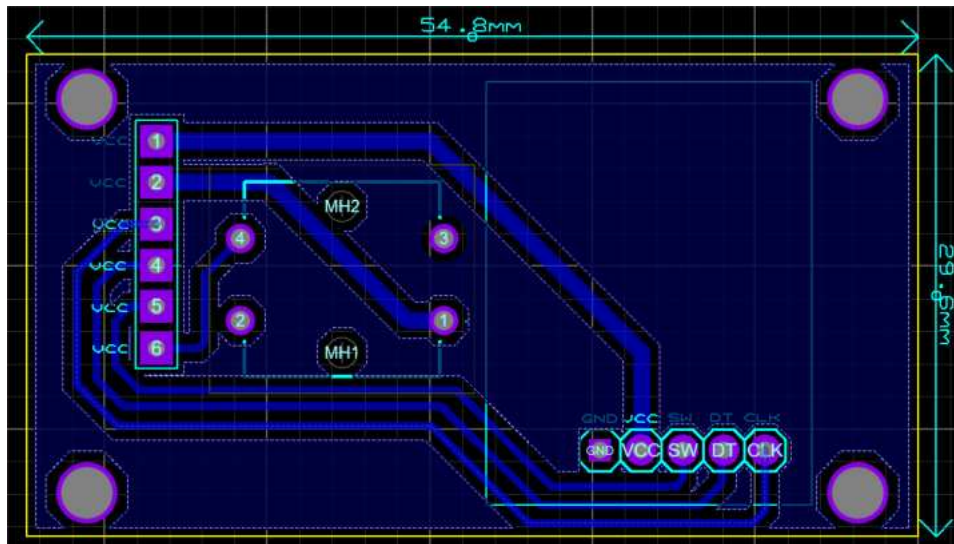


Figura 65. Diseño final placa PCB

Fuente: Elaboración propia (2023)

Y por último en la figura 66 se puede observar el modelo 3D de la placa PCB para tener una imagen más clara de cómo es el acabado en físico.

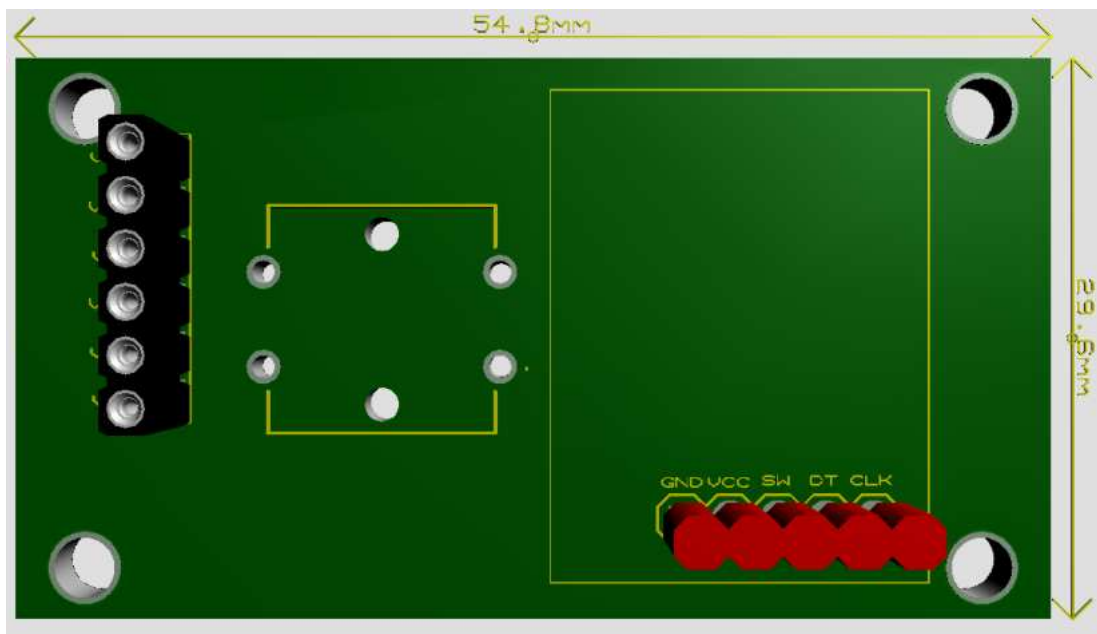


Figura 66. Diseño final placa PCB 3D

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.2 Diseño prototipo del software del radio stack

En este subtítulo se desarrolló el software para el microcontrolador del radio stack y se usó un software de terceros para la comunicación entre el Arduino y MFS2020.

- Selección software de comunicación entre Arduino y MFS2020: El software que se hace uso se mencionó anteriormente en el punto 2.13 que es Bits And Droids Flight Connector.
- Selección de librerías para controlar el hardware requerido: Las librerías estándar ofrecidas por Arduino y por terceros que se usaron son las siguientes:
 - Arduino: Para controlar la placa Arduino y realizar cálculos.
 - Wire: Permite comunicarse con dispositivos I2C / TWI.
 - Adafruit_MCP23017: Permite comunicarse con el dispositivo expensor de E/S MCP23017.
 - Rotary: Permite manejar Rotaries Encoder de manera más eficiente con algoritmos.
 - RotaryEncOverMCP: Permite unir las librerías de Adafruit_MCP23017 y Rotary para aplicar su propio algoritmo de manejo de funciones para cada Rotary encoder conectado al MCP23017 y generar interrupciones con un solo pin.
 - BitsAndDroidsFlightConnector: Permite enviar y recibir las variables de Microsoft Flight Simulator 2020 entre el microcontrolador y la aplicación Bits And Droid Flight Connector.
 - LiquidCrystal_I2C: Permite conectar y manipular una pantalla LCD mediante la comunicación I2C.
 - Serial: Permite comunicarse con otros dispositivos mediante el puerto serial.
- Programación del sketch del radio stack para arduino: El entorno de desarrollo que se utilizó para el sketch fue Arduino IDE 2.0, se detalla solo las partes más relevantes, el sketch completo se lo encuentra en repositorio del anexo C.

En la figura 67 se tiene el diagrama de flujo del sketch del radio stack.

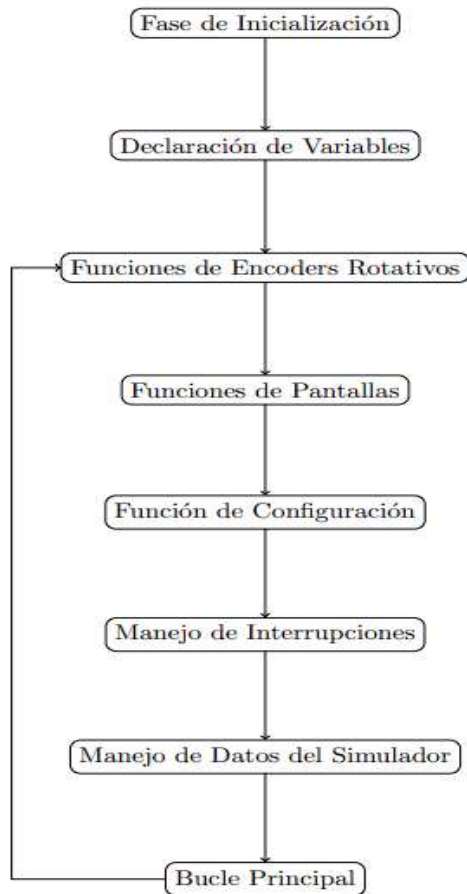


Figura 67. Diagrama de flujo sketch radio stack

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.3 Simulación del radio stack

Para la simulación del radio stack se hizo uso del mismo programa que se usó para el diseño de los esquemáticos y placas PCB, Proteus.

En la figura 68 se observa la correcta simulación de cada componente, llevada a cabo antes de la fase de implementación del prototipo del radio stack.

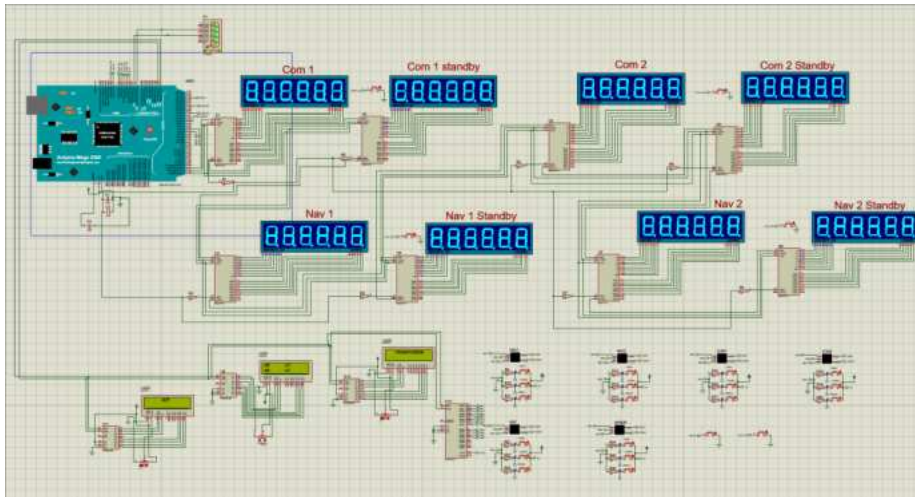


Figura 68. Simulación del radio stack

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.4 Diseño del hardware del periférico mecánico modular

Para evitar errores en la fase de diseño del prototipo del periférico mecánico modular se decidió dividir el proceso en las siguientes secciones:

- Representación visual de los dispositivos utilizados en el periférico mecánico modular
- Selección software de comunicación entre Arduino y MFS2020
- Selección de componentes

3.6.4.1 Representación visual de los dispositivos utilizados en el periférico mecánico modular

Para comprender el funcionamiento y la estructura del periférico mecánico modular, lo correcto es obtener una representación visual detallada de los dispositivos que componen este sistema, que permite ver con mayor claridad los componentes involucrados, como se puede observar en la figura 69.

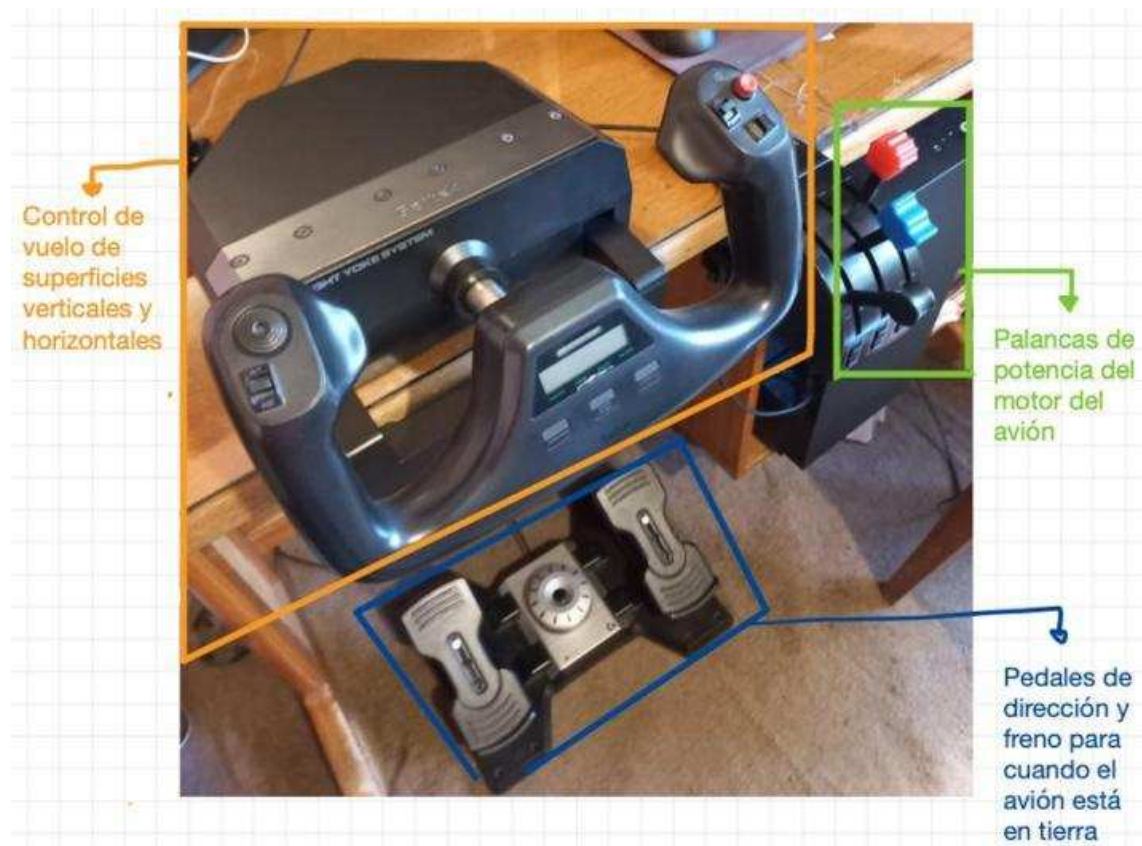


Figura 69. Representación visual periférico mecánico modular

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.4.2 Selección de componentes

Al realizar un análisis de la representación visual de los dispositivos empleados en el periférico mecánico modular, se logró identificar los componentes requeridos para su correcto funcionamiento. La lista detallada de estos componentes se encuentra en la Tabla 5.

Tabla 5. Componentes electrónicos para el radio stack

Componentes Electrónicos	Unidades
Potenciómetros tipo B de 10k ohms en adelante	5
Potenciómetros deslizantes de 10k ohms	3
Arduino Leonardo	1
Protoboard	1
Cables distintos tamaños	1
Pulsadores	3

Fuente: Elaboración propia

3.6.4.3 Diagrama circuital periférico mecánico modular

En esta parte del diseño no se necesitó usar placas PCB, todo va conectado directamente al Arduino Leonardo, el diagrama circuital se lo observa en la figura 70.

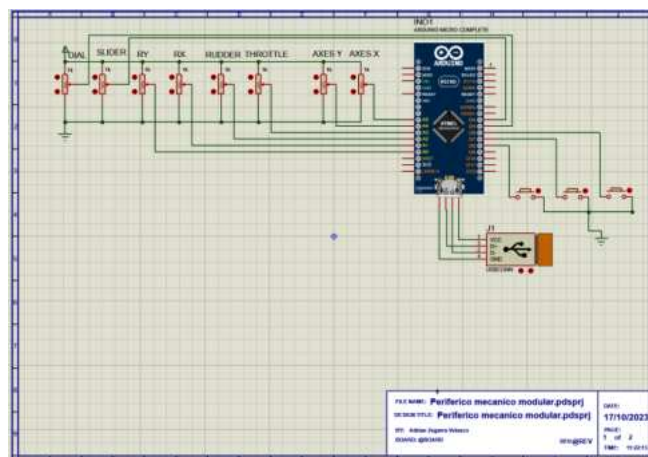


Figura 70. Nomenclatura periférico mecánico modular

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.4.4 Diseño prototipo del periférico mecánico modular

En este subtítulo se pasó a desarrollar el prototipo del software del microcontrolador para el periférico mecánico modular.

- Selección software de comunicación entre Arduino y MFS2020: Al ser el Arduino Leonardo un microcontrolador que puede programarse como USB HID (en este caso mando de juego) no es necesario ningún tipo de software para comunicarse entre Arduino y MFS2020.
- Selección de librerías para controlar el hardware requerido: Las librerías ofrecidas por terceros que se usaron son las siguientes:
 - Joystick Library: Convierte al Arduino en un mando de juego con capacidad de poder configurarlo a la necesidad del proyecto.
 - Arduino: Para controlar la placa Arduino y realizar cálculos.
- Programación del sketch del periférico mecánico modular: El entorno de desarrollo que se utilizó para el sketch fue Arduino IDE 2.0, el sketch completo se lo encuentra en el repositorio del anexo C. En la figura 71 se tiene el diagrama de flujo del sketch del periférico mecánico modular.

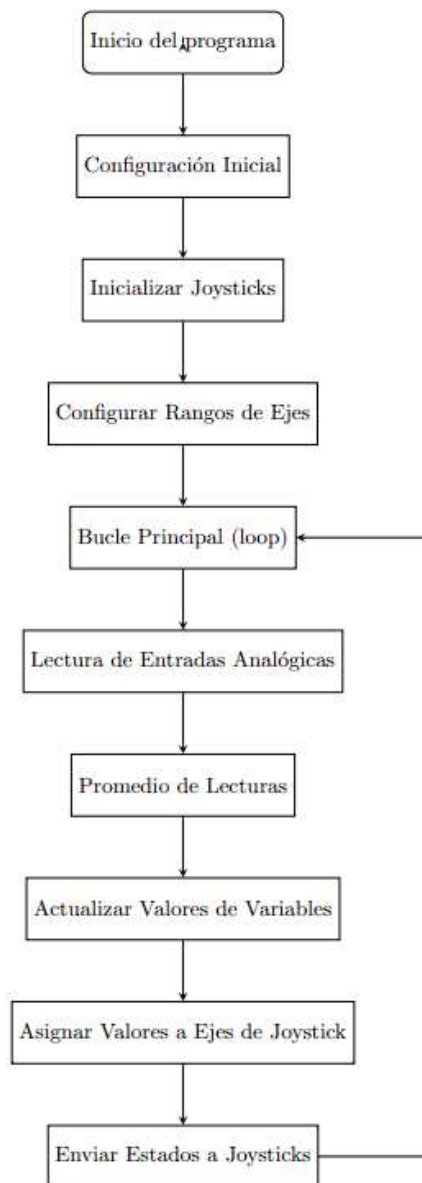


Figura 71. Diagrama de flujo sketch periférico mecánico modular

Fuente: Elaboración propia (2023)

3.6.4.5 Simulación del periférico mecánico modular

No se pudo realizar la simulación del periférico mecánico modular debido a que en Proteus y otros programas, no se puede emular una conexión USB HID.

CAPITULO 4

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace la construcción de los prototipos, sus respectivas pruebas de funcionamiento poniéndolos en marcha y los ajustes tanto de hardware y software en caso de ser necesario.

4.2 MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

La construcción y funcionamiento de los prototipos se dividió en dos partes para hacerlo más entendible y ordenado.

4.2.1 Construcción y puesta en marcha de la versión 1 del prototipo del radio stack

Se inició la construcción de prototipos individuales de cada submódulo del radio stack utilizando protoboards, con el objetivo de evitar la necesidad de soldadura. Esta metodología permitió una conexión eficiente de todos los componentes mencionados previamente en la sección 3.6.1.3, lo que resultó en un considerable ahorro de tiempo durante el proceso de montaje. Como consecuencia, se dispuso de más tiempo para llevar a cabo las pruebas iniciales de la versión 1 del prototipo del radio stack.

En la figura 72 se comenzó con la soldadura de las pantallas LCD al módulo I2C para su respectivo funcionamiento.



Figura 72. Proceso de soldadura prototipo v1 radio stack

Fuente: Elaboración propia (2023)

Siendo la figura 73 el resultado final del prototipo v1 del radio stack.

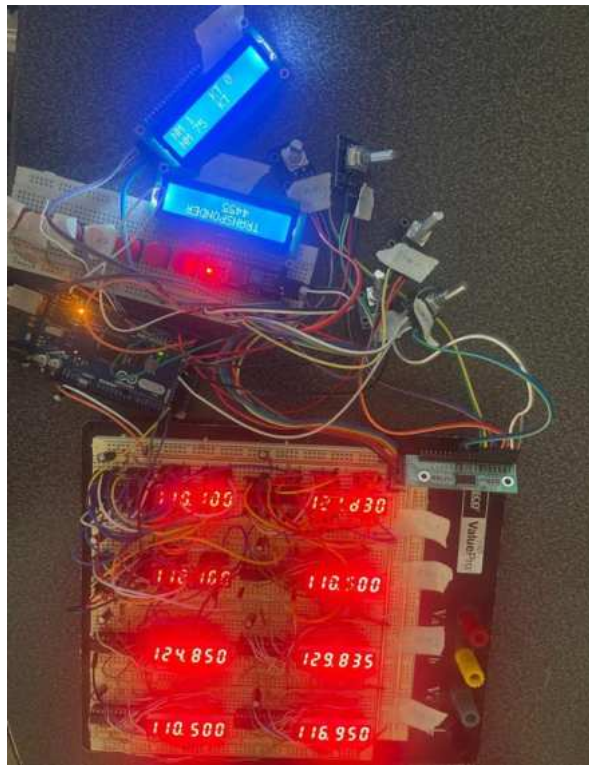


Figura 73. Resultado final del prototipo v1 del radio stack

Fuente: Elaboración propia (2023)

4.2.2 Construcción y puesta en marcha de la versión final del prototipo del radio stack

Para este subtítulo se empezó con evaluar por separado cual técnica es la más conveniente y manufacturable para cada circuito que requiere de impresión PCB y al tener ya finalizadas las placas, las colocamos en el panel del radio stack junto a los componentes electrónicos que no requirieron de placas PCB para su funcionamiento.

4.2.2.1 Impresión en placas PCB del diagrama circuital displays 7 segmentos COM y NAV

Al ser el diseño circuital más complejo de imprimir en PCB debido a que es de doble cara y con alta variedad de conexiones, se evaluó que lo más conveniente y manufacturable sería hacerlo todo con maquina CNC. Para eso requerimos el servicio de impresión de placas PCB mediante maquina CNC de la empresa Sawers Bolivia. Para esta parte se requiere 4 unidades de esta placa PCB.

Quedando de la siguiente manera la parte trasera y delantera, como se puede observar en la figura 74 y 75 respectivamente.

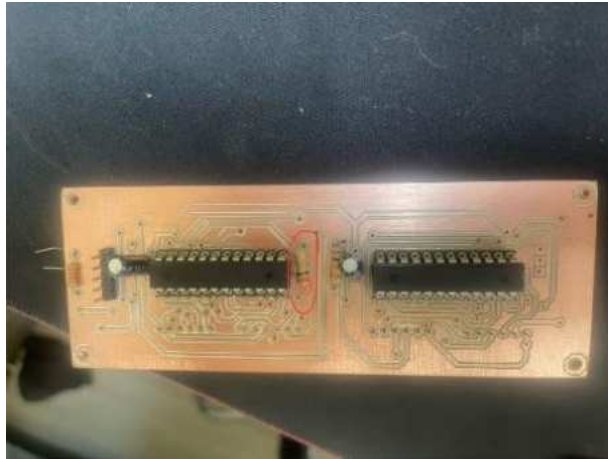


Figura 74. Impresión parte trasera diagrama circuital display 7 segmentos COM y NAV

Fuente: Elaboración propia (2023)



Figura 75. Impresión parte delantera circuital display 7 segmentos COM y NAV

Fuente: Elaboración propia (2023)

Luego de obtener la placa ya impresa, se pasó a usar barniz vitral para proteger a la placa y que sea más fácil la soldadura, quedando ya soldado como se muestra en las figuras 76 y 77.

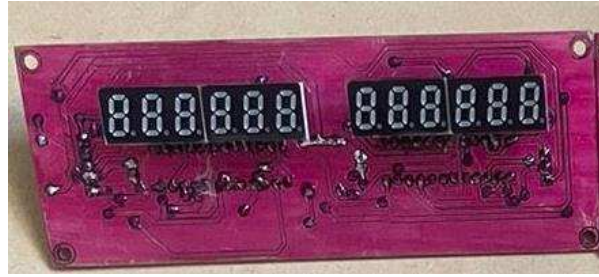


Figura 76. Impresión parte delantera circuital display 7 segmentos COM y NAV finalizada

Fuente: Elaboración propia (2023)

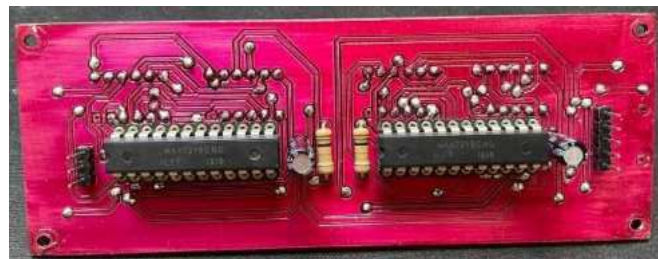


Figura 77. Impresión parte trasera circuital display 7 segmentos COM y NAV finalizada

Fuente: Elaboración propia (2023)

4.2.2.2 Impresión en placas PCB Diagrama circuital de botones y rotaries encoders COM y NAV

Al ser el diseño circuital sencillo de imprimir en PCB debido a que es de una cara y con pocas conexiones, se evaluó que lo más conveniente y manufacturable sería hacer los agujeros con máquina CNC y posteriormente usar el método de planchado para imprimir las pistas en la placa, de estas placas PCB se necesitan 2 unidades para el proyecto. En la figura 78 se observa a la máquina CNC haciendo las perforaciones.



Figura 78. Perforación placa PCB con maquina CNC

Fuente: Elaboración propia (2023)

Y en las figuras 79 y 80, se observa las pistas ya impresas y los componentes ya soldados respectivamente.

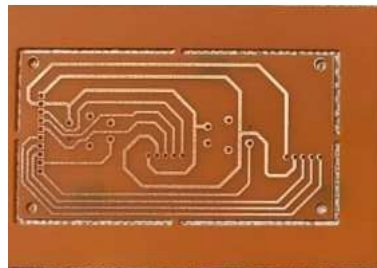


Figura 79. Placa PCB ya terminada

Fuente: Elaboración propia (2023)

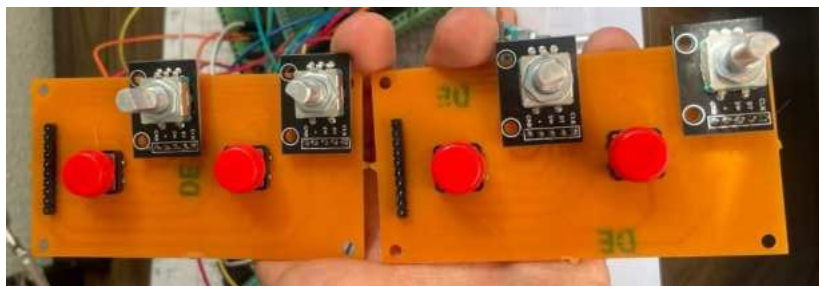


Figura 80. Placa PCB con componentes ya soldados

Fuente: Elaboración propia (2023)

4.2.2.3 Impresión en placas PCB Diagrama circuital pantalla LCD, rotary encoder y pulsador del ADF

Al ser el diseño circuital sencillo de imprimir en PCB debido a que es de una cara y con pocas conexiones, se evaluó que lo más conveniente y manufacturable sería hacer los agujeros con máquina CNC y posteriormente usar el método de planchado para imprimir las pistas en la placa, de estas placas PCB se necesita solo 1 unidad para el proyecto. Quedando la placa PCB ya terminada como se muestra en la figura 81. Y con componentes ya soldados como se muestra en la figura 82.

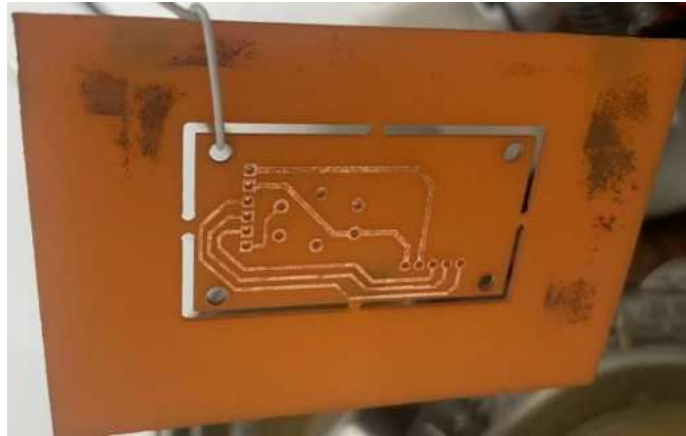


Figura 81. Placa PCB ya terminada

Fuente: Elaboración propia (2023)



Figura 82. Placa PCB con componentes ya soldados

Fuente: Elaboración propia (2023)

4.2.2.4 Unión de las placas PCB y los componentes electrónicos que no requirieron de placas PCB para su funcionamiento en el panel del radio stack

Para unir las placas PCB con los componentes electrónicos en el panel del radio stack se hizo el panel del radio stack de madera para abaratar costos, que sea de fácil realización y robustez como se observa en la figura 83.

De igual manera para hacer aún más robusto el radio stack, se optó por obtener una shield industrial para el Arduino Mega2560, así se previene que los cables se desconecten por cualquier movimiento y creen una interferencia o una falsa conexión, y hace una expansión de los pines que pueden ser usados en paralelo y así se evita usar una protoboard para poder conectar varios componentes a la alimentación o a un pin específico ya que lo tiene incluido, como se muestra en la figura 84.

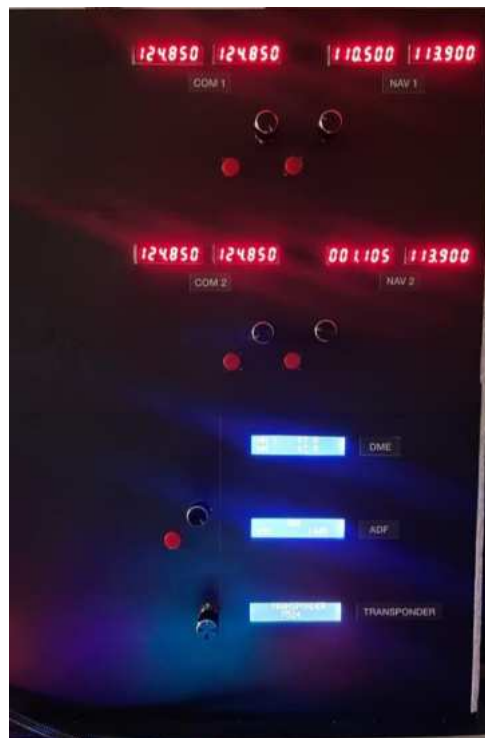


Figura 83. Panel radio stack con todos componentes eléctricos y placas PCB

Fuente: Elaboración propia (2023)

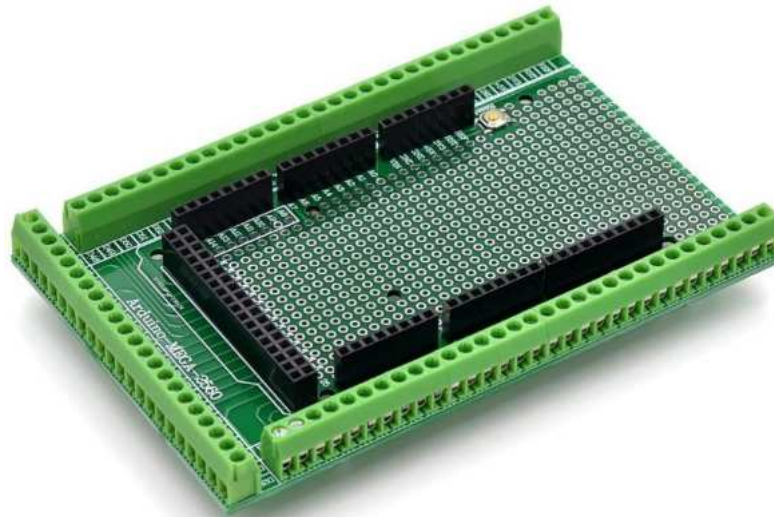


Figura 84. Shield industrial Arduino Mega2560

Fuente: Compatibel Met MEGA2560 Double-Side Pcb Prototype Schroef Terminal Blok Shield Board Kit Voor Arduino Mega 2560 / Mega2560 r3 - AliExpress (2023)

4.2.3 Resultados de la validación del prototipo del radio stack (pruebas y ajustes)

Se presentan los resultados obtenidos tras la validación del prototipo del radio stack, donde se describen las pruebas realizadas y los ajustes necesarios para garantizar su correcto funcionamiento.

Las pruebas realizadas en cada submódulo individualmente y conjuntamente fueron satisfactorias. A continuación, se detallan los parámetros específicos que fueron evaluados:

➤ **Evaluación de Submódulos:**

Se verificó individualmente el rendimiento de cada submódulo del radio stack para asegurar su funcionamiento adecuado.

➤ **Pruebas Conjuntas:**

Se llevaron a cabo pruebas para evaluar el comportamiento y la interacción entre los distintos submódulos, asegurando su correcto funcionamiento.

➤ **Eficiencia Electrónica:**

Se evaluó la respuesta eficiente de la electrónica, asegurando que las señales y comandos fueran procesados de manera rápida y precisa.

➤ **Visualización de Datos:**

Se verificó la correcta visualización de datos en los displays, asegurando que la información se presentara de manera clara y precisa.

➤ **Manipulación de Datos:**

Se evaluó la manipulación de los datos a través de los rotaries encoders y pulsadores, asegurando que la interacción con el sistema fuera fluida y sin inconvenientes.

La única observación que se encontró durante las pruebas es el siguiente:

- Por como maneja los datos el software Bits and Droids Flight Connector, al iniciar todas los displays de 7 segmentos y los LCD con los datos, algunos no cargan correctamente, pero al manipularlos posteriormente los datos con los rotaries encoders y/o los pulsadores, los datos se muestran correctamente en todo momento.

4.3 CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE LA VERSIÓN 1 DEL PROTOTIPO DEL PERIFÉRICO MECÁNICO MODULAR

Se empezó a construir el prototipo de cada submódulo del periférico mecánico modular en un protoboard para evitarse la soldadura de tal manera permitiendo hacer la conexión de todos los componentes que se detalló anteriormente en el punto 3.6.2.3 y ahorrar una enorme cantidad de tiempo en el montaje, de tal manera logrando tener más tiempo para las primeras pruebas de la versión 1 del prototipo del periférico mecánico modular.

En el primer paso se comenzó por colocar potenciómetros tipo B en el protoboard y comprobar que su funcionamiento sea correcto como se puede observar en la figura 85.

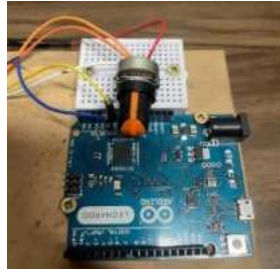


Figura 85. Potenciómetro tipo B

Fuente: Elaboración propia (2023)

En el segundo paso se comenzó por probar los potenciómetros deslizantes y comprobar que su funcionamiento sea correcto como se puede observar en la figura 86.



Figura 86. Potenciómetros deslizantes

Fuente: Elaboración propia (2023)

En el tercer paso se comenzó por colocar los pulsadores en el protoboard y comprobar que su funcionamiento sea correcto como se puede observar en la figura 87.

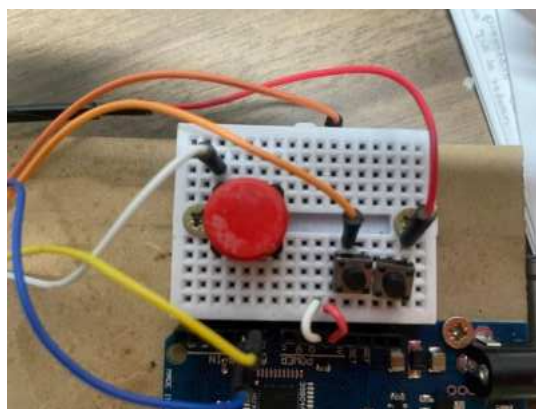


Figura 87. Pulsadores

Fuente: Elaboración propia (2023)

4.3.1 Construcción y puesta en marcha de la versión final del prototipo del periférico mecánico modular

Como uno de los requisitos del proyecto consiste en intentar conseguir un producto final lo más económico posible. Por ello, se ha usado la impresión de piezas 3D. Los modelos que se usaron se encuentran disponibles en internet, algunos modelos 3D tuvieron que ser modificados con la aplicación Autodesk Fusión 360, para encajar con las especificaciones que se requieren en el proyecto y en una situación mezclamos piezas 3D de varios diseños para poder mejorar el diseño final. Para la impresión 3D de todas las piezas se pagó un servicio de impresión 3D. Todos los archivos necesarios se podrán descargar del repositorio localizado en el anexo C. Por último, este subtítulo se divide en 3 partes para mejor entendimiento.

4.3.1.1 Construcción y prueba en marcha del control de vuelo de superficies verticales y horizontales

En el presente capítulo, se presenta el resultado final del proceso de construcción y prueba en marcha del control de vuelo de superficies verticales y horizontales. Este componente es esencial para la estabilidad y maniobrabilidad de la aeronave, si bien este apartado presenta el control de vuelo en su versión final, los interesados en ver a fondo los detalles de su construcción pueden consultar el manual disponible en el anexo D.

Quedando como resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales lo que se observa en la figura 88 y 89 respectivamente.



Figura 88. Vista frontal del resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales

Fuente: Elaboración propia (2023)

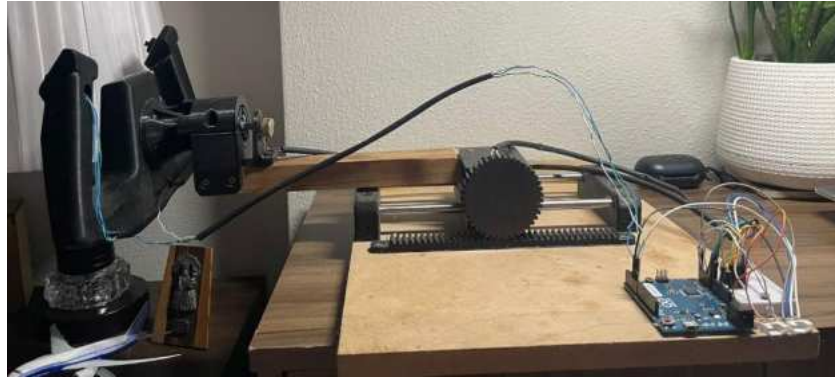


Figura 89. Vista lateral resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se detallan las pruebas realizadas y los parámetros evaluados para asegurar su correcto funcionamiento:

➤ **Prueba de Movimiento Vertical:**

Parámetros evaluados: Rango de movimiento, suavidad en la transición, ausencia de vibraciones anormales.

➤ **Prueba de Movimiento Horizontal:**

Parámetros evaluados: Amplitud y precisión en el movimiento lateral, ausencia de fricciones indebidas.

➤ **Prueba de Sincronización Vertical y Horizontal:**

Parámetros evaluados: Coordinación adecuada entre los movimientos vertical y horizontal, sincronización precisa.

➤ **Prueba de Resistencia y Durabilidad:**

Parámetros evaluados: Resistencia al uso continuo, durabilidad de los materiales ante condiciones de operación estándar.

➤ **Prueba de Respuesta a Comandos:**

Parámetros evaluados: Tiempo de respuesta a comandos de entrada, precisión en la ejecución de instrucciones.

➤ **Prueba de Calibración:**

Parámetros evaluados: Precisión en la calibración de los potenciómetros, corrección de posibles desviaciones sacando promedio cada “X” datos enviados.

➤ **Prueba de Retroalimentación Táctil:**

Parámetros evaluados: Sensibilidad y realismo del control de vuelo de superficies verticales y horizontales.

4.3.1.2 Construcción y prueba en marcha de las palancas de potencia del motor del avión.

En el presente capítulo, se presenta el resultado final del proceso de construcción y prueba en marcha de las placas de potencia del motor del avión. Este componente es esencial para controlar la potencia de los motores del avión, si bien este apartado presenta las palancas en su versión final, los interesados en ver a fondo los detalles de su construcción pueden consultar el manual disponible en el anexo E. Quedando como resultado final de la construcción de las palancas de potencia lo que se observa en la figura 90 y 91 respectivamente.



Figura 90. Vista superior de la construcción finalizada de las palancas de potencia del motor del avión

Fuente: Elaboración propia (2023)



Figura 91. Vista frontal de la construcción finalizada de las palancas de potencia del motor del avión

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se detallan las pruebas realizadas y los parámetros evaluados para asegurar su correcto funcionamiento:

➤ **Prueba de Movimiento Suave:**

Evaluar la suavidad y fluidez del movimiento de las palancas durante su manipulación.

➤ **Prueba de Precisión:**

Verificar la precisión de las palancas al realizar ajustes finos en la potencia del motor.

➤ **Prueba de Rango Completo:**

Confirmar que las palancas cubran todo el rango de movimiento esperado sin obstrucciones o puntos muertos.

➤ **Prueba de Durabilidad:**

Realizar ciclos repetitivos de movimiento para asegurar la durabilidad y resistencia de las palancas.

➤ **Prueba de Calibración:**

Verificar la precisión de la calibración de las palancas para garantizar una correspondencia adecuada entre la posición física y la potencia del motor sacando promedio cada “X” datos enviados.

➤ **Prueba de Retroalimentación Visual:**

Verificar la coherencia entre la posición física de las palancas y la representación visual en el simulador de vuelo.

4.3.1.3 Construcción y prueba en marcha de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra

En el presente capítulo, se presenta el resultado final del proceso de construcción y prueba en marcha de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra. Este componente es esencial para la maniobrabilidad de la aeronave en tierra, si bien este apartado presenta los pedales en su versión final, los interesados en ver a fondo los detalles de su construcción pueden consultar el manual disponible en el anexo F.

Quedando como resultado final de la construcción de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra lo que se observa en la figura 92 y 93 respectivamente.



Figura 92. Vista superior de la construcción finalizada de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra

Fuente: Elaboración propia (2023)



Figura 93. Vista lateral de la construcción finalizada de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra

Fuente: Elaboración propia (2023)

A continuación, se detallan las pruebas realizadas y los parámetros evaluados para asegurar su correcto funcionamiento:

➤ **Prueba de Movilidad:**

Parámetros Evaluados:

- Amplitud y suavidad de movimiento de los pedales.
- Resistencia al movimiento y sensación ergonómica.

➤ **Prueba de Frenado:**

Se realizó la prueba de efectividad y respuesta de los potenciómetros en los frenos.

➤ **Prueba de Dirección:**

Parámetros Evaluados:

- Precisión y suavidad del mecanismo de dirección de los pedales.
- Alcance completo de movimiento.

➤ **Prueba de Resistencia Mecánica:**

Parámetros Evaluados:

- Durabilidad de los materiales en condiciones de uso continuo.
- Resistencia ante fuerzas externas al mover los pedales y/o presionarlos.

➤ **Prueba de Retroalimentación Táctil:**

Parámetros Evaluados:

- Retroalimentación táctil a través de los pedales.
- Sensación realista durante las maniobras.

➤ **Prueba de Calibración:**

Parámetros Evaluados:

- Alineación adecuada de los pedales.
- Ajuste y calibración fácil para el usuario.

Verificar la precisión de la calibración de los pedales y la dirección de los pedales para garantizar una correspondencia adecuada entre la posición física y la posición en el simulador, sacando promedio cada “X” datos enviados.

4.3.2 Resultados de la validación del prototipo final del periférico mecánico modular (pruebas y ajustes)

Los resultados de las pruebas realizadas en cada submódulo individualmente y conjuntamente del periférico mecánico modular fueron satisfactorias como se puede observar en el apartado 4.3. Los movimientos de los mecanismos son suaves, no se requiere mucho esfuerzo y la electrónica responde de manera instantánea y eficiente.

Las observaciones que se encontraron en general para el periférico mecánico modular durante las pruebas son la siguiente:

- Dependiendo de la posición del potenciómetro pueden variar los rangos utilizados, por ende, se hace una prueba de los rangos que se utilizan de los potenciómetros (ya colocados en su respectivo soporte) para luego mapear con la función “map” al valor correcto, porque se tendrán lecturas erróneas si no se lo hace.
- Al desconectar de la alimentación externa, cuando se vuelve a alimentar para hacer uso, hay que recalibrarlo en el menú de dispositivos de juegos de Windows.

4.3.3 Diagrama circuital final del radio stack y el periférico mecánico modular

Se presentan los diagramas circuitales finales del radio stack y el periférico mecánico modular en la figura 94 y 95 respectivamente.

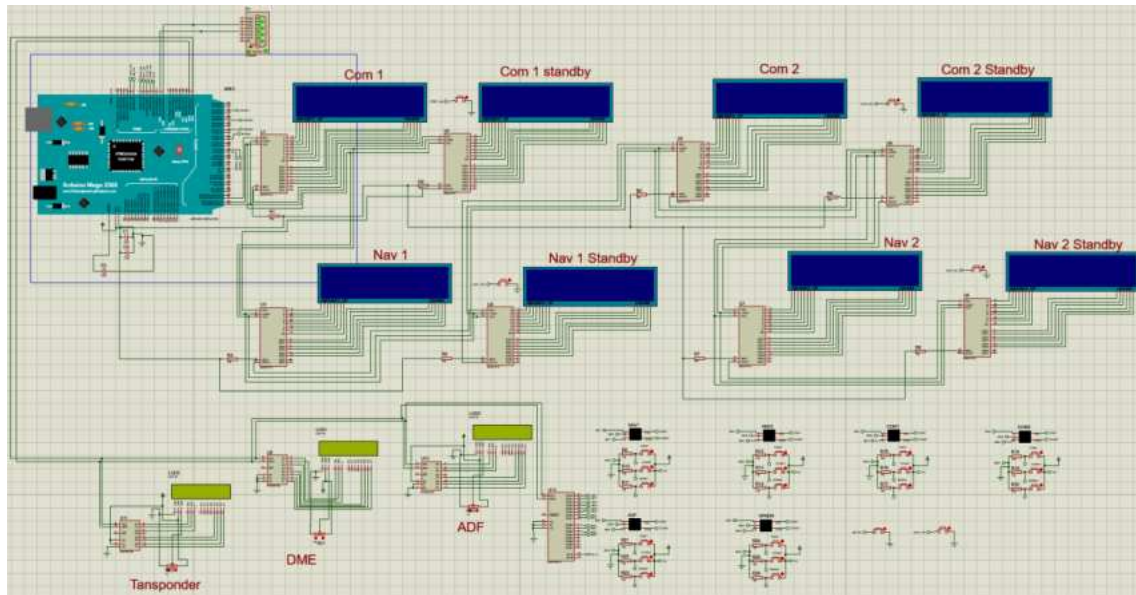


Figura 94. Diagrama circuital final del radio stack

Fuente: Elaboración propia (2024)

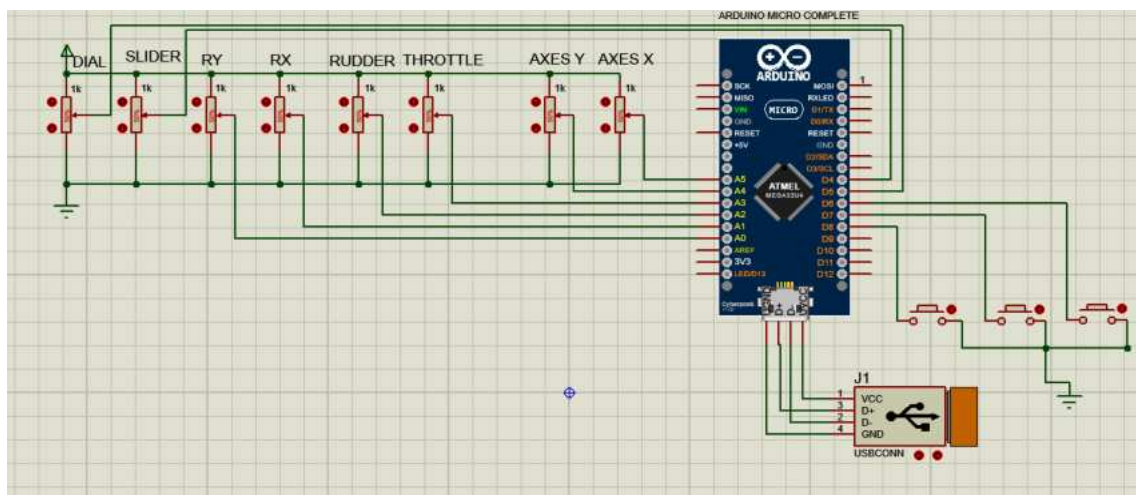


Figura 95. Diagrama circuital final periférico mecánico modular

Fuente: Elaboración propia (2024)

CAPITULO 5

EVALUACION FINANCIERA (COMPARADA)

En este capítulo, se hace la evaluación financiera, que va más allá de la simple comparación de costos y beneficios con sistemas equivalentes que existen en el mercado. También sirve como respaldo financiero del proyecto.

5.1 INVERSIONES REQUERIDAS (COSTOS)

Se muestran en distintas tablas las inversiones requeridas para poder desarrollar e implementar el proyecto físicamente, para una mejor organización y comprensión, se dividió en dos partes.

5.1.1 Inversiones requeridas para el radio stack

Se hace paso a mostrar las inversiones que se requirieron para el radio stack en la tabla 6, donde se detalla todo el material usado y su precio en el mercado.

Tabla 6. Inversión para el radio stack

Materiales para Radio Stack			
Material	Unidades	Precio unidad (Bs)	Total Unidades (Bs)
MAX7219	8	8	64
7 SEGMENTOS 3 DIGITOS(0.56 inch)CC	16	5,5	88
ROTARY ENCODER	6	12	72
BOTONES(12x12x7.3) mas tapa	5	2,5	12,5
PANTALLAS LCD azules 16x2	3	22	66
MODULOS I2C LCD	3	11	33
regleta 40 pins tornados	5	5	25
shield terminal mega2560	1	65	65
capacitores 10 uf a 25v	8	1	8
Mcp23017	1	39	39
cloruro ferrico	1	22	22
pcb de 25x20 cm	3	16,5	49,5
Impresión placas PCB displays 7 seg	5	65	325
barnis vitral	1	20	20
plastoformo	1	5	5
madera 70x70 cm	2	20	40
tornillos M3 de 10mm	20	2	2
Paquete de papel fotografico tamaño carta	1	25	25
Rollo de estaño de 0.8mm 100gr	1	48	48
Total(Bs)			1009

Fuente: Elaboración propia (2024)

Siendo la inversión final para el radio stack el total de 1009 Bs.

5.1.2 Inversiones requeridas para el periférico mecánico modular

Se muestran por submódulos las inversiones que se requirieron para el periférico mecánico modular.

5.1.2.1 Inversiones requeridas para las palancas de potencia del avión

Se hace paso a mostrar las inversiones que se requirieron para las palancas de potencia en la tabla 7, donde se detalla todo el material usado y su precio en el mercado.

Tabla 7. Inversión para las palancas de potencia del avión

Materiales para throttle			
Material	Unidades	Precio unidad (Bs)	Total unidades (Bs)
arduino leonardo	1	80	80
potenciómetros deslizantes	3	30	90
impresión 3d	1	160	160
tuboo de fierro o algun material parecido de 8mm de diametro y 125 de largo minimo	1	20	20
linear motion ball bearing scs8uu o el que entre	3	24	72
tornillos M3 de 10mm	8	1,5	12
cables de varios tamaños	40	20	20
Total(Bs)			454

Fuente: Elaboración propia (2024)

Siendo la inversión final para las palancas de potencia del avión el total de 454 Bs.

5.1.2.2 Inversiones requeridas para el control de vuelo de superficies verticales y horizontales

Se hace paso a mostrar las inversiones que se requirieron para el control de vuelo de superficies verticales y horizontales en la tabla 8, donde se detalla todo el material usado y su precio en el mercado.

Tabla 8. Inversión para para el control de vuelo de superficies verticales y horizontales

Materiales para el Yoke			
Material	Unidades	Precio unidad(Bs)	Total unidades(Bs)
impresion 3D	1	300	300
arduino leonardo	1	80	80
rodamiento 30x42x7	3	20	60
Acople metalico servomotor	1	4	4
8mm rodamiento lineal	2	28	56
8mm eje lineal de minimo 200mm	2	20	40
V wheels	2	19	38
potenciómetros tipo b minimo 10k	2	3	6
madera			0
cables de varios tamaños	40	20	20
ligas	2	1	2
tornillos M3 de varios tamaños	20	2,25	2,25
Total(Bs)			608,25

Fuente: Elaboración propia (2024)

Siendo la inversión para el control de vuelo de superficies verticales y horizontales el total de 608,25 Bs.

5.1.2.3 Inversiones requeridas para los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra

Se hace paso a mostrar las inversiones que se requirieron para los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra en la tabla 9, donde se detalla todo el material usado y su precio en el mercado.

Tabla 9. Inversión para los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra

Materiales para rudder pedals			
Material	Unidades	Precio unidad(Bs)	Total unidades(Bs)
impresion 3D	1	160	160
arduino leonardo	1	80	80
potenciómetros tipo b minimo 10k	3	3	9
madera			0
cables de varios tamaños	40	20	20
ligas	2	1	2
tornillos M3 diferentes tamaños	20	2,25	2,25
rodamiento 30x42x7	1	20	20
8mm rodamiento lineal	2	28	56
8mm eje lineal de minimo 200mm	2	20	40
rodamiento de bolas 8x22x7	2	5	10
tuercas de 7mm	2	2	4
Total(Bs)			403,25

Fuente: Elaboración propia (2024)

Siendo la inversión para los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra el total de 403,25 Bs.

5.1.3 Inversión total para el proyecto desarrollo e implementación de un periférico mecánico modular y radio stack para el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020

Se hace paso a mostrar la inversión total que se requirió para desarrollar e implementar el proyecto en su totalidad en la tabla 10.

Tabla 10. Inversión total para el proyecto

Precio proyecto: Desarrollo e implementación de un periférico mecánico modular y radio stack para el simulador de vuelo microsoft flight simulator 2020		
	Partes	Precio (Bs)
	periférico mecánico modular	1465,5
	radio stack	1009
Total (Bs)		2474,5

Fuente: Elaboración propia (2024)

Siendo la inversión para el proyecto desarrollo e implementación de un periférico mecánico modular y radio stack para el simulador de vuelo Microsoft Flight Simulator 2020 el total de 2474,5 Bs.

5.2 GASTOS DE FUNCIONAMIENTO

En los gastos de funcionamiento se contempla lo que son licencias de software que se necesita para el funcionamiento del proyecto como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Gastos funcionamiento

	Concepto	Cantidad	Precio unidad (Bs)	Total Unidades (Bs)
	Microsoft Flight Simulator 2020 paquete básico	1	417,6	417,6
	Bits And Droids Flight Connector	1	0	0
	Autodesk 360 Licencia Estudiantil	1	0	0
	Android IDE 2.0	1	0	0
	Proteus 8.16 licencia estudiantil	1	0	0
Total (Bs)				417,6

Fuente: Elaboración propia (2024)

Siendo los gastos de funcionamiento el total de 417,6 Bs.

5.3 RELACIÓN BENEFICIO/COSTO COMPARADO CON UN SISTEMA

EQUIVALENTE DISPONIBLE EN EL MERCADO

Se muestra en la tabla 12 el costo de los productos correspondientes que tiene la empresa Logitech y los del proyecto desarrollado respectivamente. Por último, se hace un análisis y explicación de la relación beneficio/costo de cada uno.

Tabla 12. Comparación de costos de productos de Logitech y del proyecto desarrollado

Logitech				Proyecto desarrollado			
Producto	Imagen	Unidades	Precio Unidad (Bs)	Producto	Imagen	Unidades	Precio Unidad (Bs)
Panel de Radio		2	2065,46	Radio Stack		1	1009
Pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra		1	1170,44	Pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra		1	403,25
Control de vuelo de superficies verticales y horizontales, y palancas de potencia del avión		1	1170,44	Control de vuelo de superficies verticales y horizontales		1	608,25
				Palancas de potencia del avión		1	454
Total (Bs)			4406,34	Total (Bs)			2474,5

Fuente: Elaboración propia (2024)

Por lo que para Logitech se tiene un precio total de 4406,34 Bs, y para el proyecto realizado se tiene un precio total de 2474,5 Bs.

Posteriormente se procede a hacer el análisis de costo/beneficio de cada uno:

- Logitech: El beneficio/costo que nos otorga Logitech es en su totalidad el acabado físico ya que es un acabado profesional y demasiado robusto.
- Periférico mecánico modular y radio stack: El beneficio/costo que otorga el proyecto desarrollado son dos:
 - Existe una diferencia de 1931,84 Bs a favor, teniendo un acabado casero pero robusto y que cumple las mismas funciones.

- El radio stack es más completo que el panel de radio de Logitech, ya que el de Logitech solo muestra un dato a la vez, mientras que el radio stack muestra todos los datos todo el tiempo.

Entonces se llega a la conclusión de que el proyecto desarrollado en este documento tiene mejor relación beneficio/costo que Logitech.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo final, se reúnen todos los resultados de la investigación y el desarrollo que se han llevado a cabo a lo largo de este proyecto para llegar a una o varias conclusiones y recomendaciones.

6.1 CONCLUSIONES

- Este proyecto demuestra la aplicación efectiva en un 100% de los conocimientos adquiridos durante el curso de estudio de la carrera de Ing. Electrónica, desde el diseño de circuitos y la programación de microcontroladores hasta la implementación de sistemas para cumplir con tareas específicas.
- En el periférico mecánico modular y el radio stack, se llevaron a cabo un total de 10 pruebas, y arrojaron resultados satisfactorios, alcanzando un rendimiento óptimo de un 95% en total. Debido a que se observó que el radio stack, al utilizar el software de terceros Bits and Droids Flight Connector, presenta un error al encenderse, ya que no despliega toda la información en las pantallas hasta que se actualizan los datos; sin embargo, su funcionamiento es correcto en todo momento después de esta actualización de datos.
- Se identificaron desafíos significativos, como la necesidad de lijar y perforar el 80% de las piezas 3D. Este proceso fue necesario debido a que las piezas no alcanzaron la perfección, principalmente porque se optó por utilizar un material resistente pero económico, lo cual afectó su precisión. Estos desafíos no solo proporcionaron valiosas lecciones aprendidas, sino que también indicaron áreas para posibles mejoras físicas y/o mecánicas en futuras actualizaciones del proyecto, para lograr un acabado profesional que se asemeje a los productos existentes en el mercado.
- El proyecto logró un notable nivel de modularidad y satisfacción del usuario, recibiendo una calificación promedio de 9,7 en una escala del 1 a 10 en las encuestas de satisfacción del usuario que se encuentran en el anexo G. Esto se debe a que permite a los usuarios diseñar y utilizar sus propias piezas,

adaptándolas al equipo para lograr la máxima fidelidad según la aeronave específica que estén utilizando en el simulador.

- La implementación de materiales de bajo costo y la tecnología de impresión 3D permitieron la realización del proyecto con un presupuesto total de 2474,5 Bs. Este costo, que es 43,86% inferior a las alternativas comerciales, resultó en una excelente relación calidad-precio para el proyecto.

6.2 RECOMENDACIONES

- En el periférico mecánico modular, procurar no llegar al rango límite físico de los potenciómetros, utilizar su rango medio, porque al llegar en todo momento al límite físico, puede dañarse su mecanismo interno.
- En el periférico mecánico modular, los cables tienen que estar bien soldados y conectados al Arduino y al protoboard porque al ser lecturas analógicas puede tenerse lecturas erróneas debido a interferencias electromagnéticas o por una mala conexión.
- Las ligas utilizadas para que los submódulos del periférico mecánico modular vuelva a su posición central pueden ser de cualquier tamaño mientras ambas sean iguales, en este caso son muy grandes y se pasó a redoblar las ligas para tener la posición central correctamente y que no se suelten al llegar a los extremos del rango de movimiento.
- La conexión de cables al Arduino es crucial, ya que los protocolos de comunicación I2C y SPI son extremadamente sensibles a interferencias electromagnéticas. Una conexión deficiente o soldadura incorrecta puede ocasionar la presentación de datos erróneos en los displays de 7 segmentos y LCD.
- Se puede ampliar y modificar tanto el radio stack y el periférico mecánico modular según la necesidad del usuario, usando expansores o los pines que sobran de las tarjetas Arduino.
- En caso de mal funcionamiento o cuelgue de la placa Arduino, desconectar y volver a conectar.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

- **3D:** Tres dimensiones.
- **5V:** Alimentación de 5 voltios corriente continua.
- **Amperio (A):** Unidad de medida de la corriente eléctrica.
- **ADF:** Automatic Direction Finder (Buscador de Dirección Automático).
- **AM:** Amplitude Modulation (Amplitud modulada).
- **CAD:** Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora).
- **CNC:** Computer Numerical Control (Control Numérico por Computadora).
- **COM:** Communication (Comunicación).
- **DC:** Direct Current (Corriente Continua).
- **DME:** Distance Measuring Equipment (Equipo de Medición de Distancia).
- **DIY:** Do It Yourself (Hazlo tu mismo).
- **DP:** Dot Point (Punto decimal).
- **E/S:** Input/Output (Entrada/Salida).
- **G:** GIGA
- **GPIO:** General Purpose Input/Output (Entrada/Salida de uso General).
- **GND:** Ground (Tierra).
- **HID:** Human Interface Device (Dispositivos de Interfaz Humana).
- **Hz:** Hertz.
- **IC:** Integrated Circuit (Circuito Integrado).
- **IDE:** Integrated Development Environment.
- **I2C:** Inter-Integrated Circuit (Circuito Intra-Integrado).
- **INT:** Interrupt (Interrupción).
- **k:** Kilo.
- **LCD:** Liquid Crystal Display (Pantalla de Cristal Líquido).
- **LED:** Light-Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz).
- **M:** Mega.
- **Mbps:** Mega bits per second (Mega bits por segundo).
- **MISO:** Master input, Slave output (Maestro adentro, Esclavo afuera).

- **MOSI:** Master output, Slave input (Maestro afuera, Esclavo adentro).
- **MSFS2020:** Microsoft Flight Simulator 2020.
- **NC:** Normally Closed (Normalmente Cerrado).
- **NAV:** Navegation (Navegación).
- **NO:** Normally Open (Normalmente Abierto)
- **Ohmio (Ω):** Unidad de medida de la resistencia eléctrica.
- **PCB:** Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso).
- **PC:** Personal Computer (Computadora Personal).
- **R/W:** Read/Write (Leer/Escribir).
- **RX:** Receiver (Receptor).
- **SS:** Slave Select (Selector Esclavo).
- **SCL:** Serial Clock (Reloj Serial).
- **SDA:** Serial Data (Dato Serial).
- **SMD:** Surface Mounting Device (Dispositivo de Montaje Superficial).
- **SCK:** Serial Clock (Reloj Serial).
- **SPI:** Serial Peripheral Interface (Interfaz Periférica Serial).
- **Th:** Thousandths of an inch (Milesimas de pulgada)
- **TX:** Transmitter (Transmisor).
- **UART:** Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal).
- **USB:** Universal Serial Bus (Bus Universal Serial).
- **uF:** MicroFarad (MicroFaradio).
- **V+:** Positive Voltage (Voltaje Positivo).
- **VCC:** Positive Voltage (Voltaje Positivo).
- **Voltio (V):** Unidad de medida de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.
- **VOR:** Very High Omnidirectional Range (Radio faro omnidireccional de muy alta frecuencia).
- **WASM:** Web Assembly (Ensamblador Web).
- **XPNDR:** Transponder (Transpondedor).

BIBLIOGRAFÍA

- Sistema de Aterrizaje por Instrumentos en los aviones más modernos del mundo. Disponible en: <https://elvueloporinstrumentos.blogspot.com/2015/10/sistema-de-aterrizaje-por-instrumentos.html> (Consultado el 7 de febrero de 2022).
- Primer piloto automático para uso en aviones y sistemas de asistencia a la conducción aeronáutica. Disponible en: <https://tecvolucion.com/primer-piloto-automatico-para-avion-sistemas-asistencia-conduccion> (Consultado el 7 de febrero de 2022).
- Historia de la Aviación: Un Viaje Fascinante a Través de los Cielos azules del mundo en el que vivimos cada día. Disponible en: <https://easbcn.com/historia-de-la-aviacion-un-viaje-fascinante-a-traves-de-los-cielos/> (Consultado el 7 de febrero de 2022).
- Todo sobre simuladores de vuelo y clasificaciones del mismo. Disponible en: <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/606/844> (Consultado el 7 de febrero de 2022).
- "Cessna 172SP Old School Cheap Radio Stack Retrofit Classic. Disponible en: <https://forums.x-plane.org/index.php?/files/file/71692-cessna-172sp-old-school-cheap-radio-stack-retrofit/> (Consultado el 7 de febrero de 2022).
- Logitech. Disponible en: <https://www.logitech.com/en-us> (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- Flight Simulator Rudder Pedals. Disponible en: <https://www.logitechg.com/en-us/products/flight/flight-simulator-rudder-pedals.945-000024.html> (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- Flight Simulator Yoke System. Disponible en: <https://www.logitechg.com/es-es/products/flight/flight-simulator-yoke-system.945-000004.html> Consultado el 14 de febrero de 2022).
- About Turtle Beach. Disponible en: <https://www.turtlebeach.com/pages/about-turtle-beach> (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- Velocity One Flight. Disponible en: <https://www.turtlebeach.com/pages/velocity-one-flight> (Consultado el 14 de febrero de 2022).

- Microsoft Flight Simulator X fandom page to learn everything about flight simulator X and especifications for the pc to fly confortable and easy. Disponible en: https://flight.fandom.com/wiki/Microsoft_Flight_Simulator_X (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- Microsoft Flight Simulator (2020) fandom flight page to learn everything about flight simulator 2020 and especifications for the pc and xbox. Disponible en: [https://flight.fandom.com/wiki/Microsoft_Flight_Simulator_\(2020\)](https://flight.fandom.com/wiki/Microsoft_Flight_Simulator_(2020)) (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- X-Plane Desktop buy it. Disponible en: <https://www.x-plane.com/desktop/buy-it/> (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- Prepar3D fandom page to learn everything about prepar3d lockheed martin and especifications for the pc to fly confortable in a easy way forever. Disponible en: [https://flight.fandom.com/wiki/Prepar3D#:~:text=Prepar3D%2C%20often%20s hortened%20to%20just,v5\)%2C%20released%20in%202020](https://flight.fandom.com/wiki/Prepar3D#:~:text=Prepar3D%2C%20often%20s hortened%20to%20just,v5)%2C%20released%20in%202020) (Consultado el 14 de febrero de 2022).
- Todo Simuladores de Vuelos. Disponible en: <http://www.srvsop.aero/site/wp-content/uploads/2017/12/12a.-SIMULADORES.pdf> (Consultado el 24 de febrero de 2022).
- Full Motion Flight Simulators. Disponible en: <https://www.afgsim.com/es/full-motion-flight-simulators/> (Consultado el 24 de febrero de 2022).
- EspInstrumotor. Disponible en: <https://www.lavionnaire.fr/EspInstrumotor.php> (Consultado el 24 de febrero de 2022).
- Nondirectional Beacon (NDB) explicación sencilla para todo mundo. Disponible en: https://hmn.wiki/es/Nondirectional_beacon (Consultado el 26 de febrero de 2022).
- Radiofaro Omnidireccional de VHF (VOR) explicación sencilla. Disponible en: <https://elvueloporinstrumentos.blogspot.com/2013/08/radiofaro-omnidireccional-de-vhf-vor.html> ((Consultado el 26 de febrero de 2022).
- Equipo medidor de distancia (DME) explicación sencilla para todos. Disponible en: https://www.ecured.cu/Equipo_medidor_de_distancia ((Consultado el 26 de febrero de 2022).

- Bits and Droids. Disponible en: <https://www.bitsanddroids.com/> ((Consultado el 26 de febrero de 2022).
- Wire Library - Arduino Reference for use in diy projects. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/wire/> (Consultado el 18 de agosto de 2023).
- Serial Library - Arduino Reference for use in diy projects. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/> (Consultado el 18 de agosto de 2023).
- Rotary Encoder over MCP23017 to use for projects made by arduino. Disponible en: <https://github.com/maxgerhardt/rotary-encoder-over-mcp23017> (Consultado el 18 de agosto de 2023).
- Arduino learn Bus SPI . Disponible en: <https://proyectoarduino.com/arduino-bus-spi/> (Consultado el 23 de agosto de 2023).
- SPI vs I2C: Cómo elegir el mejor protocolo para sus chips de memoria y usarlo correctamente. Disponible en: <https://resources.altium.com/es/p/spi-versus-i2c-how-choose-best-protocol-your-memory-chips> (Consultado el 23 de agosto de 2023).
- Tutorial LCD con I2C: Controla un LCD con solo dos pines. Disponible en: https://naylampmechatronics.com/blog/35_tutorial-lcd-con-i2c-control-a-un-lcd-con-solo-dos-pines.html (Consultado el 23 de agosto de 2023).
- Ejemplo básico con IC MAX7219: Matriz LED y visualización de texto en displays. Disponible en: <https://www.instructables.com/Ejemplo-b%C3%A1sico-con-IC-MAX7219-Matriz-LED-y-visuali/> (Consultado el 1 de septiembre de 2023).
- Reading several rotary encoders with arduino for diy projects. Disponible en: <https://arduino.stackexchange.com/questions/52909/reading-several-rotary-encoders/52926#52926> (Consultado el 1 de septiembre de 2023).
- Protocolo USB. para aprender todo sobre el usb y sus funciones. Disponible en: <https://arquitecturadecomputadora.wordpress.com/2013/05/21/protocolo-usb/> (Consultado el 1 de septiembre de 2023).

- Human Interface Devices (HID) Overview from Microsoft español. Disponible en: <https://learn.microsoft.com/es-es/windows-hardware/drivers/hid/> (Consultado el 1 de septiembre de 2023).
- Qué es Autodesk Fusion 360 y como usarlo correctamente. Disponible en: <https://www.prototicad3d.com/2017/01/que-es-autodesk-fusion-360.html> (Consultado el 2 de septiembre de 2023).
- Proteus diseño de placas PCB electrónicas de manera sencilla y con acabado profesional. Disponible en: <https://www.hubor-proteus.com/proteus-pcb/proteus-pcb/2-proteus.html> (Consultado el 2 de septiembre de 2023).

ANEXOS

ANEXO A PINES IC MAX7219

- Conexiones de alimentación: Pin 4, 9 (GND) y 19 (+5V) Es decir que se conecta la fuente de alimentación para el funcionamiento del circuito integrado y los 7 segmentos.
- Ajuste de corriente: Pin 18(Iset) Se conecta a +5V mediante una resistencia que debemos calcular mediante una tabla proporcionada por el fabricante para ajustar el consumo de corriente del conjunto de LEDs como protección.
- Segmentos: Pines 14,15,16,17,20,21,22 y 23 Estos se conectarán a las conexiones para cada segmento.
- Dígitos: Pines 2,3,5,6,7,8,10 y 11 Se conectarán a las conexiones para los dígitos de cada 7 segmentos a utilizar.
- Interfaz serie: Pines 1(DIN),12(Load) y 13(CLK) Es la conexión que se realizará al microcontrolador.
- Salida de interfaz serie: Pin 24 (DOUT) Es la salida serie, para poder encadenar varios MAX7219 si se requiere y se conectará al pin de entrada (DIN) del siguiente MAX7219.

ANEXO B PINES IC MCP23017

- GPB0-GPB7: Pines 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Son pines de E/S del GPIO B que pueden activar interrupciones y pueden tener una resistencia pull-up interna.
- GPA0-GPA7: Pines 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 Son pines de E/S del GPIO A que pueden activar interrupciones y pueden tener una resistencia pull-up interna.
- Vdd: Pin 9 Es la conexión a 5V de la alimentación.
- Vss: Pin 10 Es la conexión a GND de la alimentación.
- NC: Pin 14 Es pin de no conexión, es decir no se conecta.
- SCL: Pin 12 Es la conexión I2C del reloj serial.

- SDA: Pin 13 Es la conexión I2C de los datos seriales.
- A0: Pin 15 Es el pin 0 de la dirección I2C, debe conectarse a Vcc o Vss de manera externa.
- A1: Pin 16 Es el pin 1 de la dirección I2C, debe conectarse a Vcc o Vss de manera externa.
- A2: Pin 17 Es el pin 2 de la dirección I2C, debe conectarse a Vcc o Vss de manera externa.
- RESET: Pin 18 Es el pin que reinicia el circuito integrado al activarlo con unos cero lógicos.
- INT B: Pin 19 Es el pin de interrupción de salida B, que puede ser activado como flanco de subida, bajada o por cambio de estado.
- INT A: Pin 20 Es el pin de interrupción de salida A, que puede ser activado como flanco de subida, bajada o por cambio de estado.

ANEXO C LINK DEL REPOSITORIO DE GITHUB DEL PROYECTO REALIZADO

[adrexzvii/Proyecto-De-grado-UMSS-Electronica \(github.com\)](https://github.com/adrexzvii/Proyecto-De-grado-UMSS-Electronica)

Código QR repositorio GitHub del proyecto realizado



Fuente: Elaboración propia (2024)

ANEXO D MANUAL DE ARMADO Y PIEZAS PARA EL CONTROL DE VUELO DE SUPERFICIES VERTICALES Y HORIZONTALES

Las piezas con sus respectivos nombres se encontrarán en este mismo anexo para tener mejor conciencia de a que pieza nos referimos en el armado. Para el armado se siguieron los siguientes pasos.

1. A la pieza 1 le añadimos los dos rodamientos de 30x42x7 mm en cada extremo, atornillamos su tapa que es respectivamente la pieza 2 con 2 tornillos M.3 y de 15mm de largo. Por último, pasamos por los rodamientos la pieza 3. Para tener armado el soporte del control de vuelo.

Soporte del control de vuelo



Fuente: Elaboración propia (2023)

2. Al soporte del control de vuelo atornillamos la pieza 4 conocida como Yoke con 5 tornillos de 15 mm.

Soporte del control de vuelo con el yoke



Fuente: Elaboración propia (2023)

3. Para tener la pieza que une el soporte del control de vuelo con la base deslizante, se cortó una madera de 27cm de largo, 4cm de ancho y 2cm de alto.

Pieza de madera



Fuente: Elaboración propia (2023)

4. La base deslizante o pieza 5 unimos con 2 rodamientos lineales de 8mm de diámetro interno, 15mm de diámetro externo y 45mm de largo. Por último, unimos ambas partes de la base deslizante con 6 tornillos de 20mm.

Base deslizante



Fuente: Elaboración propia (2023)

5. Unimos la pieza de madera en sus dos extremos con el soporte del control de vuelo con el yoke del paso 2. Y por último unimos esas 2 piezas con la base deslizante con 8 tornillos de 15mm.

Base deslizante unida con el soporte del control de vuelo con el yoke



Fuente: Elaboración propia (2023)

6. Unimos el soporte del control de vuelo con el yoke con la pieza 6 y el potenciómetro hub con 4 tornillos de 20mm, para que se sujete firmemente el potenciómetro.

Potenciómetro Hub unido al control de vuelo con el yoke



Fuente: Elaboración propia (2023)

7. Unimos el potenciómetro con el soporte de potenciómetro o pieza 7 a la madera con 2 tornillos de 20mm, pero estando lo más cerca posible al soporte de control de vuelo con el yoke para que cuando se gire el yoke gire el potenciómetro.

Soporte potenciómetro unido a la pieza de madera y al control de vuelo con el yoke



Fuente: Elaboración propia (2023)

8. Unimos los ejes lineales de 8mm de diámetro por 250mm de largo con la base deslízate atravesando los 2 rodamientos lineales, unimos ambos topes a cada extremo (piezas 8 y 9 respectivamente) con los ejes lineales y por último unimos ambos topes de movimiento a la base de madera con dimensiones de 41,3cm de ancho, 27cm de largo y 1.5 cm de grueso, con 4 tornillos de 15mm, para sostener todo el control de vuelo de superficies verticales y horizontales.

Unión base deslizante con topes de movimiento y el control de vuelo con el yoke



Fuente: Elaboración propia (2023)

9. Unimos el ultimo soporte de potenciómetro (pieza 10) con el segundo potenciómetro y al estar ya unidos ambos, pasamos a unirlos con 4 tornillos de 10mm a la base deslizante.

Unión base deslizante con el ultimo soporte de potenciómetro



Fuente: Elaboración propia (2023)

10. Colocamos el riel (pieza 11) por la que se moverá el engranaje (pieza 12) a la base de madera con 2 tornillos de 15mm, en su parte interna del engranaje colocamos el rodamiento de 30x42x7mm. Y unimos el engranaje con el potenciómetro de tal manera que pueda recorrer todo el riel sin llegar a los límites de movimiento del potenciómetro.

Unión soporte potenciómetro con el rodamiento y el riel



Fuente: Elaboración propia (2023)

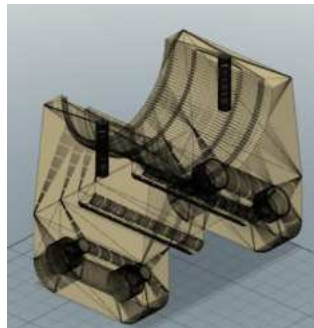
11. Por último, colocamos en el lado izquierdo de los topes mecánicos 2 tornillos con la cabeza afuera para poder colocar las ligas, que su función es que vuelva el control de vuelo al punto medio después de hacer algún movimiento y luego se pasa a cablear todos los potenciómetros soldando los cables con los pines de cada uno. Quedando como resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales.

Resultado final de la construcción del control de vuelo de superficies verticales y horizontales



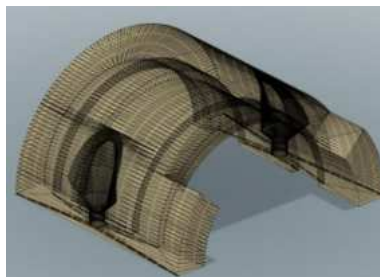
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 1



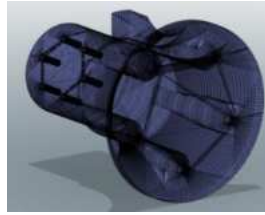
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 2



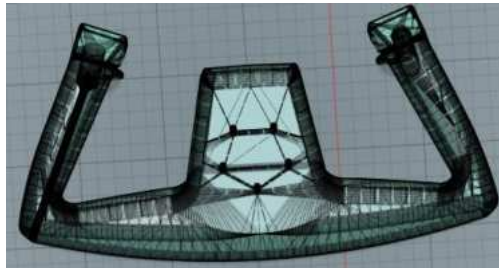
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 3



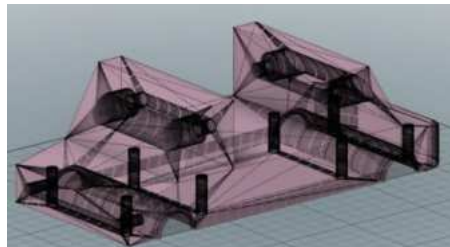
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 4

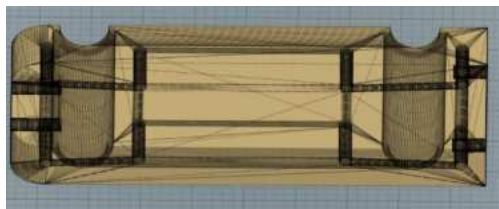


Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 5

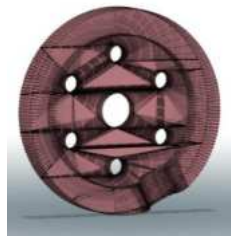


Fuente: Elaboración propia (2023)



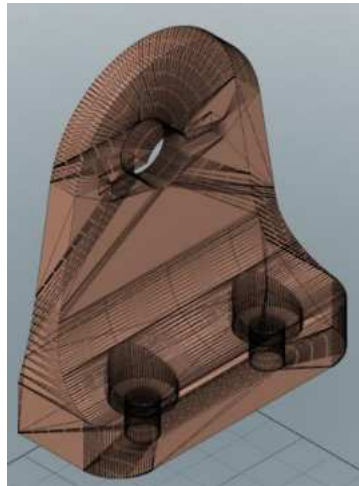
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 6



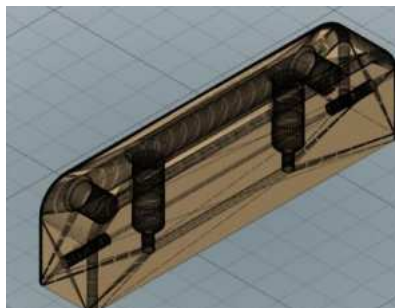
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 7



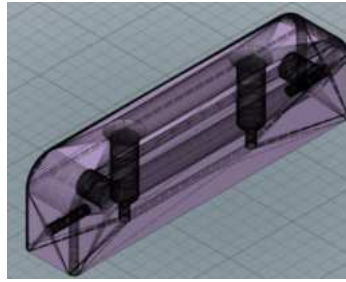
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 8



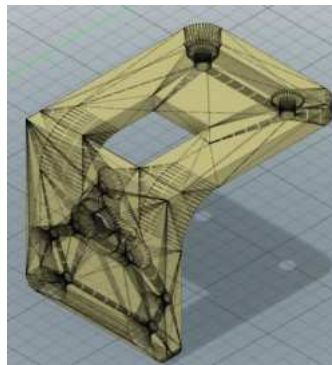
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 9



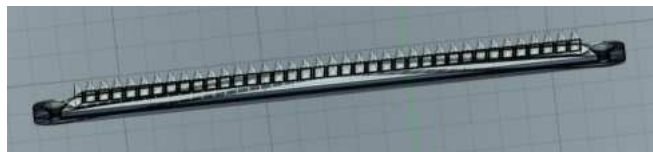
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 10



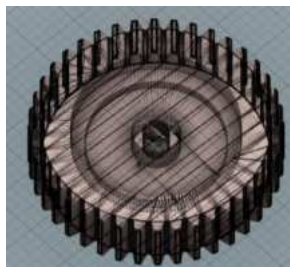
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 11



Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 12



Fuente: Elaboración propia (2023)

ANEXO E MANUAL DE ARMADO Y PIEZAS PARA LAS PALANCAS DE POTENCIA DEL MOTOR DEL AVIÓN

Las piezas con sus respectivos nombres se encontrarán en el mismo anexo para tener mejor conciencia de a que pieza nos referimos en el armado. Para el armado se siguieron los siguientes pasos.

1. A la pieza 1 le añadimos en su respectivo compartimiento los 3 cojinetes lineales tipo bloque SC8UU, de modo que los agujeros de la pieza 1 coincidan con los agujeros de los cojinetes lineales.

Resultado unión Base de las palancas de potencia del motor del avión y los cojinetes lineales



Fuente: Elaboración propia (2023)

2. Al resultado del paso 1, ahora añadimos los 3 potenciómetros deslizantes a una distancia prudente para poder usar todo su rango de movimiento, posteriormente se los pega a la base para evitar movimientos innecesarios.

Potenciómetros ubicados en la base de las palancas de potencia del motor del avión



Fuente: Elaboración propia (2023)

3. Al resultado del paso 2, ahora añadimos los 3 ejes lineales de 8mm de diámetro y 125mm de largo en cada agujero de la base de las palancas de potencia del motor del avión y colocar el sujetador al potenciómetro deslizante (pieza 2).

Ejes lineales ubicados en los agujeros de la base de las palancas de potencia del motor del avión y a los potenciómetros



Fuente: Elaboración propia (2023)

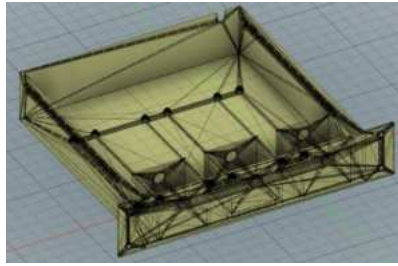
4. Unimos la pieza 3, 4 y 5 respectivamente a los extremos libres de cada eje lineal, luego a la pieza 4 y 5 se le coloca su tapa (pieza 6), se le pone la tapa de la base de las palancas de potencias (pieza 7) y se realiza el cableado de cada potenciómetro.

Construcción finalizada de las palancas de potencia del motor del avión



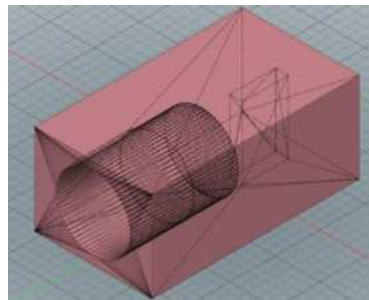
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 1



Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 2



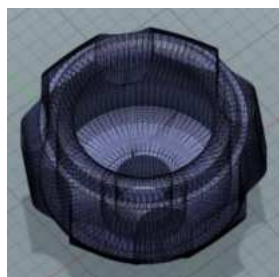
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 3



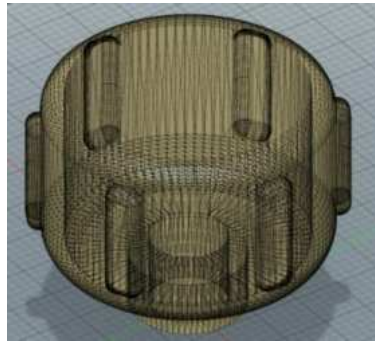
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 4



Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 5



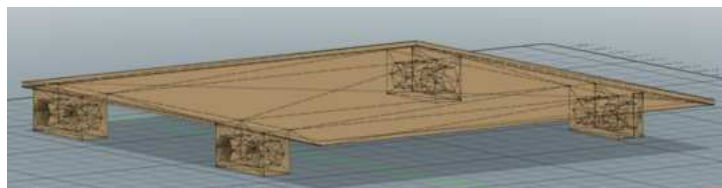
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 6



Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 7



Fuente: Elaboración propia (2023)

ANEXO F MANUAL DE ARMADO Y PIEZAS PARA LOS PEDALES DE DIRECCIÓN Y FRENO PARA CUANDO LA AERONAVE ESTÁ EN TIERRA

Las piezas con sus respectivos nombres se encontrarán en el mismo anexo para tener mejor conciencia de a que pieza nos referimos en el armado. Para el armado se siguieron los siguientes pasos.

1. A la pieza 1 le agregamos un rodamiento de 3/8 x 7/8 de pulgada en la parte superior y para sujetarlo usamos una tuerca de 6mm de diámetro. Luego agregamos las ruedas V (V wheel) de diámetro de 5mm en la cara lateral izquierda y derecha Repetimos este paso dos veces, uno para el lado izquierdo y otro para el lado derecho.

Soporte pedal con el rodamiento superior



Fuente: Elaboración propia (2023)

2. Al resultado del paso 1, se le agrega un rodamiento lineal de 8mm de diámetro interno, 15mm diámetro externo y 45mm de largo. Repetimos este paso dos veces, uno para el lado izquierdo y otro para el lado derecho.

Soporte pedal el rodamiento lineal



Fuente: Elaboración propia (2023)

3. A la pieza 2 se le agregan los rodamientos de 30x42x7mm, uno en la parte inferior y otro en la parte superior.

Parte superior eje movimiento con su rodamiento



Fuente: Elaboración propia (2023)

Parte inferior eje movimiento con su rodamiento



Fuente: Elaboración propia (2023)

4. A la pieza 3 se le agrega un potenciómetro hub usando 3 tornillos de 10mm para que cuando gire la pieza 3 con otro mecanismo.

Engranaje con el potenciómetro hub



Fuente: Elaboración propia (2023)

5. A la pieza 2 y a la pieza del paso 4 (pieza 3) las juntamos con la base del pedal (pieza 4).

La Base del pedal



Fuente: Elaboración propia (2023)

6. Al resultado del paso 2 se le une los últimos 2 ejes lineales de 250mm y los topes mecánicos (Pieza 5 y 6 respectivamente) que van atornillados a la base de madera de 50x33x1.5cm con 4 tornillos de 15mm.

Topes mecánicos y ejes lineales



Fuente: Elaboración propia (2023)

7. Al resultado del paso 6 se le une a la pieza resultante del paso 5, de manera que quede los rodamientos de la pieza 1 y los extremos de la pieza 2 unidos perfectamente para tener un movimiento libre, siendo atornillado con 6 tornillos de 15mm.

Base de los pedales construida y atornillada a la base de madera



Fuente: Elaboración propia (2023)

8. Luego a la pieza 6 se le atornilla el soporte del potenciómetro (pieza 7) con 2 tornillos de 15mm.

Tope mecánico con el soporte del potenciómetro



Fuente: Elaboración propia (2023)

9. Se colocan la pieza 8 y 9 en cada la esquina superior izquierda y derecha respetivamente para que se puedan usar ligas y al hacer algún movimiento el pedal vuelva a la posición central.

Figura 134. Sujetadores de ligas para ejercer fuerza



Fuente: Elaboración propia (2023)

10. A la pieza 10 que es la base del pedal se atornillan con tornillos de 10mm las piezas 11, 12(para poner los resortes borrar porque es de referencia esto), 13 y 14(Soporte talón de Aquiles, borrar esto es solo para tener referencia de a que pieza me refiero). Repetimos este paso dos veces, uno para el lazo izquierdo y otro para el lado derecho.

Parte superior pedal



Fuente: Elaboración propia (2023)

Parte superior pedal con soporte talón de aquiles



Fuente: Elaboración propia (2023)

11. Luego a la pieza 15 que es la tapa del pedal se le coloca el potenciómetro junto con la pieza 16. Repetimos este paso dos veces, uno para el lado izquierdo y otro para el lado derecho.

Parte inferior pedal con el potenciómetro



Fuente: Elaboración propia (2023)

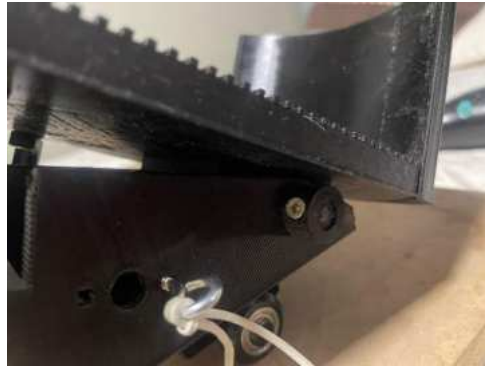
12. Juntamos las piezas resultantes del paso 10 y 11 con un pasante (pieza 17) y su seguro (pieza 18) con un tornillo de 10mm. Repetimos este paso dos veces, uno para el lado izquierdo y otro para el lado derecho.

Sujetador para unir la parte superior e inferior del pedal



Fuente: Elaboración propia (2023)

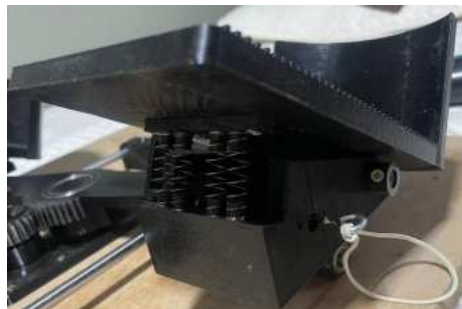
Sujetador para unir la parte superior e inferior del pedal con el tornillo de sujeción



Fuente: Elaboración propia (2023)

13. Al resultado del paso 12 se le colocan los resortes.

Resortes colocados entre la parte superior e inferior del pedal



Fuente: Elaboración propia (2023)

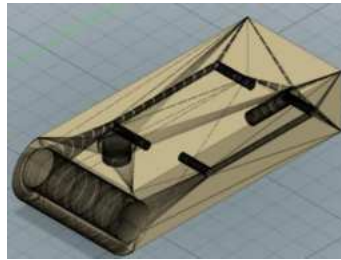
14. Por último, a la pieza resultante del paso 2 se le atornillan los pedales que son las piezas resultantes del paso 13.

Figura 141. Construcción finalizada de los pedales de dirección y freno para cuando la aeronave está en tierra

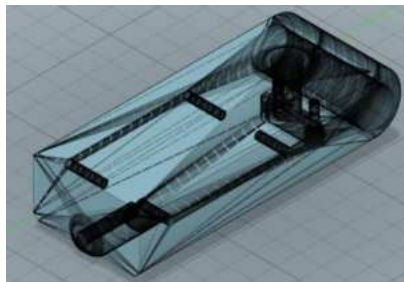


Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 1

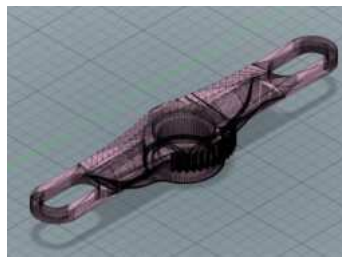


Fuente: Elaboración propia (2023)



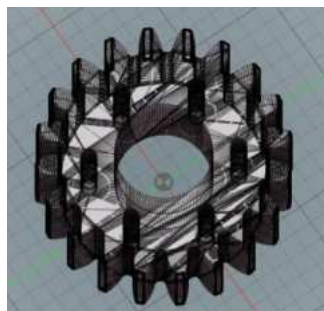
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 2



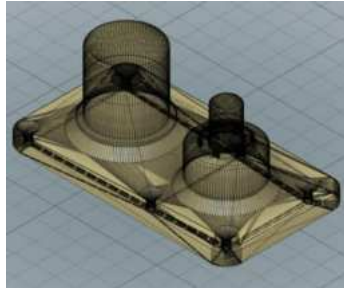
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 3



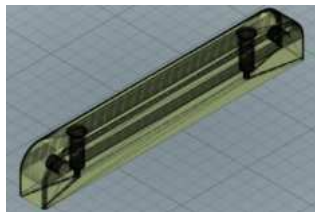
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 4



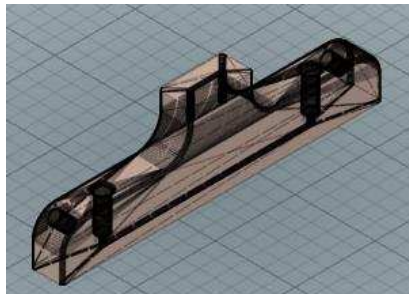
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 5



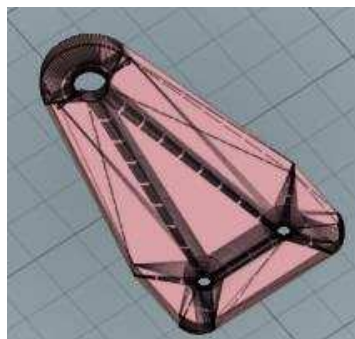
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 6



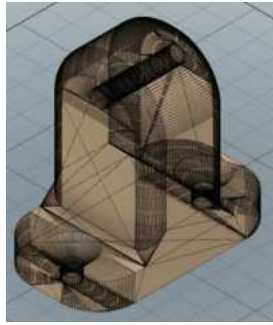
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 7



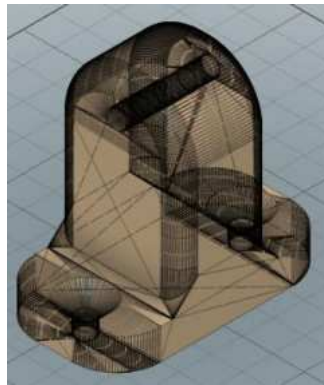
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 8



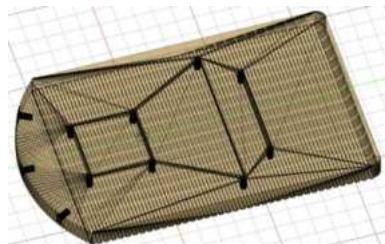
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 9



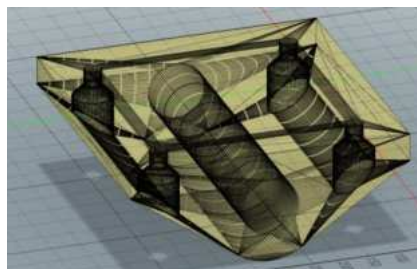
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 10



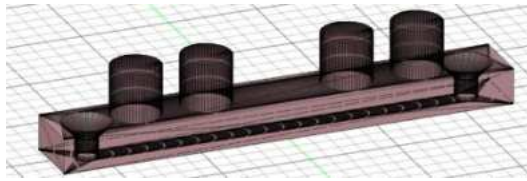
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 11



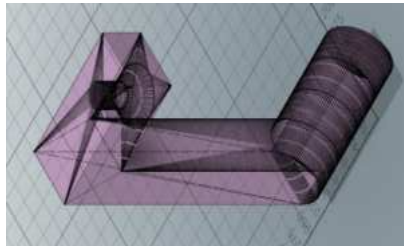
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 12



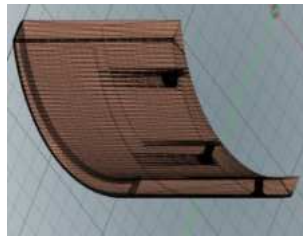
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 13



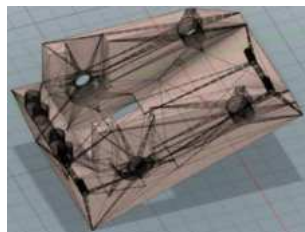
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 14



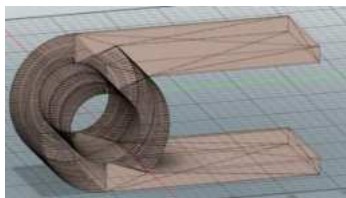
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 15



Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 16



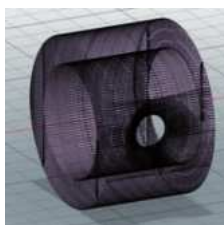
Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 17



Fuente: Elaboración propia (2023)

Pieza 18



Fuente: Elaboración propia (2023)

ANEXO G ENCUESTAS DE SATISFACCIÓN DEL USUARIO

Encuesta de Satisfacción del Usuario

Fecha: 13 de abril de 2024

Nombre del Encuestado: Luis Roberto Zegarra Dorado

1. En una escala del 1 al 10, ¿qué calificación le darías a la satisfacción del usuario con el proyecto?

- 1 (Muy insatisfecho) 2 3 4 5 6 7 8 9 10 (Muy satisfecho)

10

Instrucciones: Por favor, utiliza la escala del 1 al 10 para responder a cada pregunta, donde 1 representa el extremo menos favorable y 10 representa el extremo más favorable. Tu opinión es importante para mejorar nuestro proyecto.

Notas adicionales:

- La satisfacción del usuario se refiere a la percepción general del usuario sobre el proyecto en términos de utilidad y adaptabilidad para lograr la máxima fidelidad en simuladores de vuelo.

Gracias por tu participación.

Encuesta de Satisfacción del Usuario

Fecha: 13 de abril de 2024

Nombre del Encuestado: Santiago Zegarra Velasco

2. **En una escala del 1 al 10, ¿qué calificación le darías a la satisfacción del usuario con el proyecto?**

- 1 (Muy insatisfecho) 2 3 4 5 6 7 8 9 10 (Muy satisfecho)

10

Instrucciones: Por favor, utiliza la escala del 1 al 10 para responder a cada pregunta, donde 1 representa el extremo menos favorable y 10 representa el extremo más favorable. Tu opinión es importante para mejorar nuestro proyecto.

Notas adicionales:

- La satisfacción del usuario se refiere a la percepción general del usuario sobre el proyecto en términos de utilidad y adaptabilidad para lograr la máxima fidelidad en simuladores de vuelo.

Gracias por tu participación.

Encuesta de Satisfacción del Usuario

Fecha: 13 de abril de 2024

Nombre del Encuestado: Kevin Cespedes Aguilar

3. **En una escala del 1 al 10, ¿qué calificación le darías a la satisfacción del usuario con el proyecto?**

- 1 (Muy insatisfecho) 2 3 4 5 6 7 8 9 10 (Muy satisfecho)

9

Instrucciones: Por favor, utiliza la escala del 1 al 10 para responder a cada pregunta, donde 1 representa el extremo menos favorable y 10 representa el extremo más favorable. Tu opinión es importante para mejorar nuestro proyecto.

Notas adicionales:

- La satisfacción del usuario se refiere a la percepción general del usuario sobre el proyecto en términos de utilidad y adaptabilidad para lograr la máxima fidelidad en simuladores de vuelo.

Gracias por tu participación.