

**DESARROLLO DE UN BANCO DE CONTROL DE ÁNGULO DE ATAQUE PARA
PERFILES AERODINÁMICOS EN UN TÚNEL DE VIENTO.**

KEVIN ANDERSON PALACIOS MENA

ANDRES STIVEN SANTA LLANOS

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

DIRECTOR

M.Sc. Adonái Zapata Gordon



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
PEREIRA
2023**

**DESARROLLO DE UN BANCO DE CONTROL DE ÁNGULO DE ATAQUE PARA
PERFILES AERODINÁMICOS EN UN TÚNEL DE VIENTO.**

**KEVIN ANDERSON PALACIOS MENA
CC.1088344910**

**ANDRES STIVEN SANTA LLANOS
CC.1010094261**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

**DIRECTOR
M. Sc. Adonái Zapata Gordon**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
PEREIRA
2023**

Resumen

La conceptualización, diseño y construcción de aeronaves es un proceso complejo que requiere de numerosos cálculos, estimaciones y pruebas para asegurar su eficiencia y seguridad en el aire. Uno de los aspectos importantes en este proceso es el ángulo de ataque del perfil aerodinámico, que influye en la sustentación, fuerza de arrastre y entre otras. Por esta razón, es fundamental contar con un banco de pruebas que permita medir con precisión el ángulo de ataque en un túnel de viento, para observar las variables dependientes en distintos diseños de perfiles.

En este proyecto se ha desarrollado un banco de pruebas para perfiles aerodinámicos a escala, que utiliza tecnología avanzada de hardware y software para medir el ángulo de ataque con gran precisión. Para lograrlo, se ha creado un sistema embebido basado en un microcontrolador ESP32, que monitorea, controla y procesa los comandos del usuario en tiempo real para el control del perfil. Además, se ha diseñado desde cero tanto el hardware, firmware y mecánica, utilizando elementos fáciles de conseguir en el mercado. El proceso de diseño y construcción del banco de pruebas ha incluido el uso de herramientas de diseño CAD para la creación de piezas, que se han fabricado con tecnología de impresión en 3D para asegurar su precisión y calidad. Asimismo, se ha diseñado y construido la parte de control y potencia del banco de pruebas, que es la encargada de mover el perfil aerodinámico en el túnel de viento.

Los resultados preliminares de este proyecto son muy alentadores, ya que se ha logrado adquirir el primer prototipo del ángulo de ataque con gran precisión. Además, se ha utilizado una aplicación móvil que permite visualizar y controlar los datos del banco de pruebas a distancia por comunicación Bluetooth, lo que facilita el proceso de medición y monitoreo.

Es importante destacar que, para un óptimo funcionamiento del banco de pruebas, es necesario ubicar correctamente el centro de masa del perfil aerodinámico. Esto se debe a que el motor que controla el giro del perfil tiene mayor precisión que fuerza en el giro, lo que podría afectar su funcionamiento si no se tiene en cuenta. Por esta razón, se recomienda seguir cuidadosamente las instrucciones y recomendaciones de diseño para asegurar que el banco de pruebas funcione de manera óptima.

En conclusión, este proyecto es de gran importancia en el campo de la aeronáutica, ya que permite realizar mediciones precisas del ángulo de ataque de perfiles aerodinámicos a escala en un entorno controlado. El uso de tecnología avanzada de hardware y software en su diseño y construcción asegura su eficiencia y calidad, y lo convierte en una herramienta valiosa para el diseño y construcción de aeronaves de alta calidad y seguridad.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	3
CAPITULO 1	1
1. Definición de la propuesta	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Problema de la investigación	2
1.3. Formulación del problema	2
1.4. Delimitación.....	2
1.5. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.6. Justificación.....	3
CAPITULO 2	4
2. Fundamentos de perfiles aerodinámicos y ángulo de ataque	4
2.1. Perfil aerodinámico.....	4
2.1.1. Partes y características principales de un perfil aerodinámico	5
2.2. Ejemplos de perfiles aerodinámicos.....	6
2.2.1. Perfiles aerodinámicos tipo NACA.....	6
2.2.2. Perfiles aerodinámicos tipo PARSEC	11
2.2.3. Perfiles aerodinámicos tipo Clark-Y	12
2.2.4. Perfiles aerodinámicos Gottingen	13
2.3. Fundamentos aerodinámicos	14
2.3.1. Teoría de la aerodinámica	14
2.3.2. Viento relativo	14
2.3.3. El principio de Bernoulli	15
2.3.4. Fundamentación del Angulo de ataque	15
2.4. Túnel de viento.....	24
2.4.1. Definición del túnel de viento	24
2.4.2. Antecedentes.....	25
2.4.3. Partes del túnel de viento	27
2.4.4. Clasificación.....	29

2.5.	Procesos de manufactura	32
2.5.1.	Manufactura aditiva (MA).....	33
2.5.2.	Categorías de la manufactura aditiva	34
2.5.3.	Pintura electrostática	38
2.5.4.	Circuito impreso (PCB).....	38
2.5.5.	Sistemas de control	40
2.6.	Software para ingeniería	42
2.6.1.	Autodesk Inventor.....	42
2.6.2.	EasyEDA	42
2.6.3.	Fritzing.....	43
CAPITULO 3		44
3.	Desarrollo de un banco de control de ángulo de ataque (BCAA).....	44
3.1.	Antecedentes	44
3.1.1.	Diseño de un túnel de viento	44
3.1.2.	Construcción del túnel de viento.....	44
3.2.	Diseño CAD del banco de ángulo de ataque	45
3.3.	Diseño y construcción del circuito para el banco de ángulo de ataque.....	64
3.3.1.	Elementos electrónicos presentes en el BCAA.....	64
3.3.2.	Diseño esquemático de la electrónica	67
3.3.3.	Construcción sistema electrónico	69
3.4.	Algoritmo de control sistemas banco de ángulo de ataque	71
3.5.	Sistema de control Bluetooth	75
Capítulo 4		79
4.	Resultados	79
4.1.	Diseño asistido por computador (CAD)	79
4.2.	Construcción circuito electrónico.....	80
4.3.	Banco de control	83
4.4.	Aplicación móvil.....	84
4.5.	Pruebas.....	87
5.	Conclusiones.....	91
6.	Recomendaciones.....	92

7. Bibliografía	93
8. Anexos	96

TABLA DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil aerodinámico (Prager, King, & Carlson, 2021).....	5
Figura 2.2. Perfil alar Naca 4 dígitos. (Pinzón Paz, 2013).....	7
Figura 2.3. Perfil alar Naca 5 dígitos. (Pinzón Paz, 2013).....	8
Figura 2.4. Perfil alar Naca 1 dígito. (Pinzón Paz, 2013).....	9
Figura 2.5. Perfil alar Naca 6 dígitos. (Pinzón Paz, 2013).....	10
Figura 2.6. Perfil PARSEC. (RODRÍGUEZ ROMÁN , HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ , & SOTO PALACIOS , 2012)	11
Figura 2.7. Perfil aerodinámico tipo Clark-Y. (Airfoil Tools, 2022)	12
Figura 2.8. Clark YH wingroot de un Yak-18T. (Megger, 2022).....	12
Figura 2.9. Gottingen 622. (Scott, 2004)	13
Figura 2.10. Gottingen 625. (Scott, 2004)	14
Figura 2.11. Fuerzas que se ejercen en un perfil aerodinámico (ala). (Zitnik, 1999).....	15
Figura 2.12. Descripción grafica de las fuerzas que se ejercen en el avión y sus respectivas alas. (Zitnik, 1999).....	16
Figura 2.13. Coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque. (Edae education, 2022)	17
Figura 2.14. Graficas de las 2 resistencias con relación a la velocidad. (Zitnik, 1999)....	17
Figura 2.15. Coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque vs coeficiente de resistencia. (Edae education, 2022)	18
Figura 2.16. Ejemplo de perdida de sustentación para un avión con respecto al AOA. (Zitnik, 1999)	19
Figura 2.17. Angulo de Ataque en un perfil aerodinámico. (Zitnik, 1999).....	20
Figura 2.18. Relación del ángulo de ataque y la relación de sustentación - resistencia. (Edae education, 2022)	21
Figura 2.19. Angulo de ataque en una aeronave. (Edae education, 2022)	22
Figura 2.20. Descripción grafica del centro de presiones en un perfil aerodinámico. (Zitnik, 1999)	22
Figura 2.21. Ejemplo de flujo de tubería simple (Prager, King, & Carlson, 2021).....	23
Figura 2.22. Patente sistema de control de capa límite para álabes de turbina eólica. (España Patente nº 07075909 .7, 2011)	25
Figura 2.23. Patente túnel de viento para el estudio de la erosión eólica. (España Patente nº 07075909 .7, 2011)	25
Figura 2.24. Descripción grafica general de un túnel de viento sus respectivas partes. (C.A Quispe Gonzales*, 2014)	27
Figura 2.25. Forma de Panel de abeja, Estructura mallada. (Mejia, 2012).....	28
Figura 2.26. Una prueba del túnel de viento muestra cómo se mueve una pelota de tenis por el aire. (NASA TV, 2017).....	29
Figura 2.27. Manufactura aditiva. (ITI, 2022).....	33
Figura 2.28. Fotopolimerización. (S., 2017).....	34
Figura 2.29. Fusión de lecho de polvo. (Orozco, 2019).....	35

Figura 2.30. Inyección de aglutinante. (Exone, 2022)	35
Figura 2.31. Inyección de material. (Kauppila, 2022)	36
Figura 2.32. Laminación de hojas. (Custom Part, 2022)	36
Figura 2.33. Extrusión de material. (S, 2017)	37
Figura 2.34. Deposición directa de energía. (Jackson, 2018)	37
Figura 2.35. Pintura electroestática. (Axalta Coating Systems , 2022).....	38
Figura 2.36. Composición PCB. (Autores).....	39
Figura 2.37. Demostración de una PCB. (Fernandez de Dios & Caride Ulloa, 2022)	39
Figura 2.38. Sistema de control en lazo abierto. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007).....	41
Figura 2.39. Sistema de control en lazo cerrado. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007).....	42
Figura 3.1. Túnel De viento en Software CAD. (Autores).....	44
Figura 3.2. Túnel de viento semillero de aeronáutica UTP. (Autores)	45
Figura 3.3. Página Airfoil Tools. (Airfoil Tools, 2022)	45
Figura 3.4. Perfil aerodinámico Clark-y. (Airfoil Tools, 2022)	46
Figura 3.5. Diseño del perfil Clark-Y. (Autores)	47
Figura 3.6. Extrusión del boceto Clark-Y. (Autores)	47
Figura 3.7. Diseño del Eje transmisión de movimiento. (Autores)	48
Figura 3.8. Perfil a escala con el centro de masa. (Autores)	49
Figura 3.9. Ensamble eje con Perfil Clark-Y (Autores)	49
Figura 3.10. Paredes internas del perfil Clark-y. (Autores).....	50
Figura 3.11. Soporte del acelerómetro e inclinómetro. (Autores)	50
Figura 3.12. Rediseño del perfil aerodinámico Clark-y. (Autores)	51
Figura 3.13. Página Grabcad.(GrabCAD).....	52
Figura 3.14. Diseño motor a pasos NEMA 17HS4401. (Autores).....	52
Figura 3.15. Diseño del acople Eje – Motor a pasos. (Autores)	53
Figura 3.16. Ensamble Eje con acople. (Autores)	53
Figura 3.17. Buje acople eje motor a pasos. (Autores).....	54
Figura 3.18. Perfil en Software CAD. (Autores).....	54
Figura 3.19. MPU - 9250 (Autores)	55
Figura 3.20. Inclinómetro. (Autores)	55
Figura 3.21. Perfil aerodinámico con instrumentos de medición. (Autores).....	56
Figura 3.22. Diseño de placa soporte motor a pasos. (Autores)	56
Figura 3.23. Soporte NEMA 17HS4401. (Autores).....	57
Figura 3.24. Ensamble motor a pasos con soporte. (Autores)	57
Figura 3.25. Ensamble de la placa con soporte del motor a pasos. (Autores)	58
Figura 3.26. Ensamble soporte del motor a pasos con el acople. (Autores)	58
Figura 3.27. Rodamiento. (Autores)	59
Figura 3.28. Diseño buje del rodamiento. (Autores)	59
Figura 3.29. Diseño soporte de rodamiento. (Autores).....	60

Figura 3.30. Diseño soporte del eje. (Autores)	60
Figura 3.31. Primer diseño del prototipo del banco. (Autores)	61
Figura 3.32. Teclado 4x4. (Autores)	61
Figura 3.33. Driver motor a pasos DRV8825. (Autores)	62
Figura 3.34. Diseño de LCD 2x16. (Autores).....	62
Figura 3.35. Diseño del microcontrolador ESP32. (Autores)	63
Figura 3.36. Soporte PCB y componentes electrónicos. (Autores)	63
Figura 3.37 Esquemático circuito electrónico. (Autores)	64
Figura 3.38. Esp32- DevKit V1. (Autores)	65
Figura 3.39. MPU9250. (Autores).....	66
Figura 3.40. Driver a4988. (Autores)	66
Figura 3.41. 42shd0034-20b motor paso a paso. (Autores)	67
Figura 3.42. Esquemático PCB EasyEDA. (Autores)	68
Figura 3.43. PCB EasyEDA. (Autores)	68
Figura 3.44. Ruteado CNC PCB. (Autores)	69
Figura 3.45. Ruteado CNC PCB. (Autores)	69
Figura 3.46. PCB con porta elementos electrónicos soldados. (Autores).....	70
Figura 3.47. Porta elementos electrónicos. (Autores)	70
Figura 3.48. Algoritmo de control, configuraciones iniciales. (Autores)	71
Figura 3.49 Función algoritmo de control paso a paso. (Autores)	72
Figura 3.50 Configuraciones iniciales algoritmo de control. (Autores).....	72
Figura 3.51 Selección modo de trabajo algoritmo de control. (Autores)	73
Figura 3.52 Algoritmo de control modo teclado. (Autores)	74
Figura 3.53. Kodular panel de inicio. (Autores)	75
Figura 3.54. Panel principal control de ángulo de ataque. (Autores).....	76
Figura 3.55 Configuración ángulo deseado aplicación. (Autores)	77
Figura 3.56 Configuración giroscopio y ángulo cero. (Autores).....	77
Figura 3.57 Programación de bloques Kodular. (Autores).....	78
Figura 4.1 Diseño mecánico final. (Autores).....	79
Figura 4.2. Diseño mecánico del panel de control. (Autores)	79
Figura 4.3. Vista 3D PCB EasyEDA. (Autores)	80
Figura 4.4. Circuito impreso final. (Autores)	80
Figura 4.5. Electrónica del banco. (Autores)	81
Figura 4.6. Electrónica completa. (Autores)	81
Figura 4.7. Carcasa protectora electrónica. (Autores).....	82
Figura 4.8. Carcasa protectora electrónica (vista interna). (Autores)	82
Figura 4.9. Banco de control ángulo de ataque para perfiles aerodinámicos en un túnel de viento. (Autores)	83
Figura 4.10. Interfaz aplicación. (Autores).....	84
Figura 4.11. Aplicación móvil, esperando ingreso de ángulo. (Autores).....	85
Figura 4.12. Aplicación móvil, conectado. (Autores)	86

Figura 4.13. Banco de control de ángulo de ataque en un túnel de viento. (Autores)	87
Figura 4.14. Banco de control de ángulo de ataque a 0°. (Autores)	87
Figura 4.15. Banco de control de ángulo de ataque a 5°. (Autores)	88
Figura 4.16. Banco de control de ángulo de ataque a -10°. (Autores)	88
Figura 4.17. Banco de control de ángulo de ataque modo bluetooth a 5° Kodular. (Autores)	89
Figura 4.18. Banco de control de ángulo de ataque modo bluetooth a 10° Kodular. (Autores)	90
Figura 8.1. Data sheet motor paso a paso 42SHD0034-20B. (Made-in-China, 2023).....	96
Figura 8.2. Esp-32 Pinout. (LastMinuteEngineers.com., 2023)	96
Figura 8.3. Giroscopio MPU-9250 datasheet. (All Data Sheet)	97
Figura 8.4. Planos soporte servo motor paso a paso. (Autores)	98
Figura 8.5. Plano soporte eje de transmisión. (Autores)	99
Figura 8.6. Plano soporte del rodamiento. (Autores)	100
Figura 8.7. Planos eje de transmisión. (Autores)	101
Figura 8.8. Planos del rodamiento. (Autores)	102
Figura 8.9. Planos del acople eje de transmisión con el servo motor. (Autores)	103
Figura 8.10. DataSheet eje de transmisión. (Autores)	104
Figura 8.11. Plano perfil aerodinámico. (Autores)	105
Figura 8.12. Plano soporte paso a paso. (Autores)	106
Figura 8.13. Algoritmo de control Arduino. (Autores)	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las velocidades en un túnel de viento. (Mejia, 2012)	30
Tabla 2. Tipo túnel de viento según su topología física (Mejia, 2012).....	32

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	16
Ecuación 2.....	16
Ecuación 3.....	18
Ecuación 4.....	21
Ecuación 5.....	23
Ecuación 6.....	23
Ecuación 7.....	23
Ecuación 8.....	23
Ecuación 9.....	24
Ecuación 10.....	28
Ecuación 11.....	30

CAPITULO 1

1. Definición de la propuesta

1.1. Introducción

Desde el inicio la aerodinámica ha sido un campo ligado a la ingeniería aeroespacial, no obstante, el primer estudio que se realizó en un vehículo fue en 1934 y se aplicó al automóvil Chrysler Airflow, el cual fue un coche de gran tamaño con una carrocería aerodinámica para reducir principalmente la resistencia del aire. Hoy en día inconvenientes como, el aumento del precio de combustible, la disminución de las fuentes de energía renovables, el efecto invernadero, etc. Han influido en la industria aeronáutica y automovilística, teniendo como relación la necesidad de mejorar desde todos los aspectos el rendimiento aerodinámico, es decir, que se debe crear diseños que mejoren bastante el rendimiento y disminuya los imperfectos, hablando desde la evolución del avión, tenemos como referencia los primeros prototipos de planeadores, con los cuales fue posible controlar el vuelo con mayor estabilidad. El ingeniero francés Clement Ader, creo el primer avión que voló aproximadamente 50 metros en 1890, esta hazaña la repitió unos años después con el Avión II y el Avión III diseñados por el mismo ingeniero, seguido por extraordinarios inventores, se logró pilotear un avión a motor hecho por el físico alemán Gustave Whitehead en 1901 con su modelo de avión número 21, el cual fue el primer avión impulsado por un motor de gasolina fabricado por él mismo, y con el que protagonizó la hazaña de ser el primer hombre en volar a motor, con esta incorporación al tema se hace referencia a la importancia de la innovación y desarrollo al campo aeronáutico y automovilístico con el fin de disminuir costos y aumentar los beneficios principalmente para el transporte que es esencial para cualquier individuo, sin nombrar los distintos campos que se aplican en la aeronáutica y que se estudian en la actualidad, tales como, estructuras de viviendas, deportistas y objetos comunes. de esa forma el estudio que se realizó en este documento trae la descripción, investigación, y desarrollo de una herramienta que estudia y analiza perfiles alares de aeronaves, el cual en la actualidad son el principal elemento sustentador en la mayoría de los aviones, además de las evoluciones de diseños y partes con diversas funcionalidades de maniobrabilidad, desde ese punto de vista, se aprecia las variables aerodinámicas que afecta directamente la optimización de un perfil alar, poniendo a prueba los diseños que se quieran utilizar con el fin de obtener los resultados para visualizar los beneficios o correcciones que se pueden realizar a un perfil alar simple.

1.2. Problema de la investigación

Debido al crecimiento exponencial en la industria de la aeronáutica, las instituciones educativas en específico, las de educación superior no cuentan con los elementos necesarios para fortalecer este tipo de industria, por ejemplo los profesores no cuenta con fundamentos en aeronáutica, no existen temarios relacionados al tema, tampoco se cuenta con equipos de laboratorio para demostrar los fenómenos físicos de la aeronáutica, además es un tema que en Colombia, lleva un gran atraso debido a la falta de desarrollo de las instituciones en los diferentes procesos ya mencionados, donde de 287 instituciones de educación superior sólo 3 instituciones cuentan con carreras relacionadas al tema. (Cybermetrics Lab, Sin fecha) (Carreras universitarias de Colombia, Sin fecha)

Para los estudiantes identificar, comprender y apropiar los conceptos relacionados con la aeronáutica en específico con la aerodinámica requieren metodología de enseñanzas diferentes a las que actualmente se utilizan en la mayoría de las instituciones educativas, la cual consiste en solo utilizar el tablero como herramienta para describir los fenómenos físicos, lo que hace que los estudiantes se les dificulte apropiar los conceptos. Esto se complementa con los altos costos de los insumos relacionados con el área de la aeronáutica ya que el costo de los instrumentos de medición y los elementos operativos conllevan una gran carga económica en el momento que se quiera experimentar de manera profesional en esta área, esto se puede analizar desde el punto en el que la universidad Pascual Bravo necesito realizar la inversión cercana 80 millones de pesos colombianos en la construcción de una aeronave eléctrica. (Infobae, 2021)

La sustentación de una aeronave depende de diferentes variables, como: la densidad, la velocidad y el ángulo de ataque, entre otras, las cuales dependen de las condiciones climáticas, por ejemplo: el 20 de junio de 2017 en Estados Unidos, en el centro sur y el suroeste, se presentaron condiciones de calor intenso, generando que las aeronaves manifestaran condiciones de disminución de sustentación, es decir, entrar en pérdida, esto hizo que las aeronaves no pudiesen aterrizar o despegar. (Zafra & Rambaldi, 2017)

1.3. Formulación del problema

¿Es viable el desarrollo de un banco de control de ángulo de ataque (BCAA) para perfiles aerodinámicos en un túnel de viento concediendo una buena precisión al momento de controlar el ángulo de ataque en el perfil aerodinámico?

1.4. Delimitación

Se realiza el banco de pruebas del control de ángulo de ataque para perfiles aerodinámicos para hacer demostraciones prácticas de la aerodinámica en un túnel de viento ya construido con las dimensiones aproximadas de 3 metros para los estudiantes

de aeronáutica del laboratorio de aeronáutica de la facultad de tecnología del programa de ingeniería mecatrónica de la universidad tecnológica de Pereira.

1.5. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Desarrollar un banco que controle con precisión el ángulo de ataque para perfiles aerodinámicos en un túnel de viento.

1.1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar y caracterizar los rangos teóricos del ángulo de ataque para los distintos perfiles aerodinámicos.
- Validar diseño del sistema mecánico y del circuito de control basado en los sistemas de simulación para el control del ángulo de ataque.
- Construir el sistema electrónico y sistema mecánico para el control del ángulo de ataque en un túnel de viento.
- Validar el sistema de control mediante pruebas aerodinámicas en un túnel de viento.

1.6. Justificación

Con base al planteamiento del problema, la metodología para el aprendizaje del campo académico de la aerodinámica en distintas instituciones de educación superior, o específicamente en la institución presente, tienen problemas al momento de demostrar los fenómenos físicos que se explican de forma teórica, es necesario complementar los conocimientos que se adquieren en las aulas de clase, por esa misma razón se plantea este proyecto que planea atribuir con una herramienta didáctica para poder aportar en conceptualizar los fenómenos explicados de la teoría en el campo, teniendo en cuenta que es una herramienta donde necesariamente depende de un túnel de viento y que se tiene, para observar el comportamiento de un objeto, donde específicamente es un perfil aerodinámico, en el cual se podrá experimentar con distintos diseños e interactuar de tal forma que se pueda visualizar las variables en el objeto, como lo son el ángulo de ataque y en consecuencia la sustentación o la resistencia al avance del perfil, además de que la herramienta se compondrá de una instrumentación necesaria para la retroalimentación y la interacción con el banco de pruebas, así mismo, el uso de una App propia para poder controlar y visualizar los datos desde cualquier teléfono inteligente.

CAPITULO 2

2. Fundamentos de perfiles aerodinámicos y ángulo de ataque

2.1. Perfil aerodinámico

El perfil aerodinámico constituye la geometría básica de las superficies aerodinámicas, cuya propiedad fundamental es la capacidad de generar sustentación en el interior de una corriente incidente. Por ello, la selección del perfil es un aspecto fundamental en el diseño de cualquier aeronave, puesto que afecta a las velocidades características (crucero; el cual es la velocidad constante que puede sostener la aeronave al momento que está en el aire, entrada en pérdida), distancias de aterrizaje, controlabilidad y principalmente influye en la eficiencia que puede tener la aeronave, es decir, la relación entre la sustentación y la resistencia. Es por ello necesario realizar un estudio detallado para elegir el perfil más adecuado para cada una de las superficies aerodinámicas. Para pruebas de este proyecto se desean estudiar el flujo de aire que pasa por el perfil y asimismo realizar el estudio para el resto de las fuerzas que influyen en el perfil que se explicará más adelante. (Rivero, 2010)

Con el fin de estandarizar la nomenclatura de los perfiles, se desarrolló una metodología la cual, mediante su nomenclatura, define el tipo de perfil a utilizar teniendo en cuenta un código numérico o dígitos específicos, esto con el fin de que cada familia pueda identificarse de manera propia siguiendo unas reglas de diseño internas para cada serie. En este proyecto se hablará posteriormente de las familias tipo NACA y PARSEC, sin embargo, existen otro tipo de familias como lo son TsAGI, Joukowsky, Clark Y, RAF, Göttingen, Eppler, NLF, GA, Wortmann, etc.

A pesar de dicha variedad de perfiles o familias que existen, no siempre lo más óptimo será elegir uno de estos, ya que es normal que hoy en día gracias a los recursos computacionales, sea más efectivo para los diseñadores crear y optimizar un perfil específico adaptado a una aplicación particular. (Jiménez García, 2020)

2.1.1. Partes y características principales de un perfil aerodinámico

En perfiles aerodinámicos se pueden distinguir dos zonas: el extradós y el intradós. El extradós será la mitad superior del perfil, donde se encuentra la zona de bajas presiones. El intradós es la mitad inferior del perfil, zona donde se ubican las altas presiones generadas por el perfil.

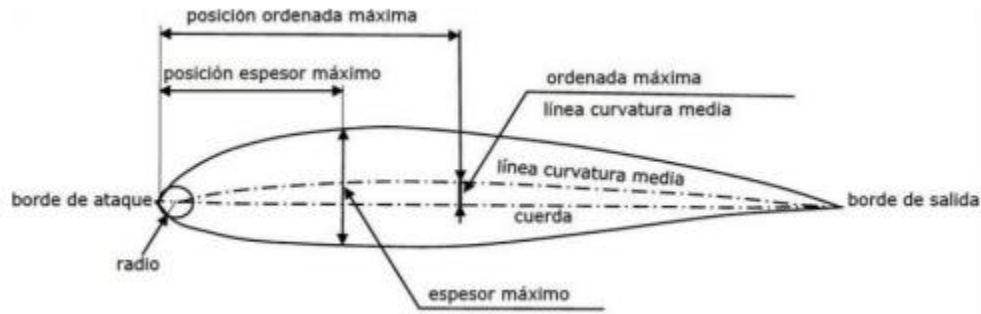


Figura 2.1. Perfil aerodinámico (Prager, King, & Carlson, 2021)

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa un perfil aerodinámico, en este se puede destacar el borde de ataque y borde de salida. El primero es el borde del perfil donde se encuentra el flujo incidente, allí se separan las líneas de corriente y la velocidad del flujo es nula. El borde de salida será el lugar donde las líneas de corriente vuelven a reunirse, siempre y cuando no ocurriese separación en la capa límite, aclarando que dichas líneas de corriente no lo hacen al mismo tiempo. (Prager, King, & Carlson, 2021)

Encontramos también en el perfil aerodinámico de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** las siguientes características:

- **Espesor máximo:** Es la distancia máxima entre extradós e intradós. Cuanto mayor sea el espesor del perfil, mayor será la resistencia aerodinámica producida.
- **Posición espesor máximo:** Es la posición en porcentaje de cuerda en la que se encuentra la máxima distancia entre el extradós y el intradós.
- **Cuerda:** La cuerda del perfil es la línea recta que une el borde de ataque con el borde de salida.
- **Línea de curvatura:** Es la línea que define el lugar geométrico de los puntos equidistantes entre intradós y extradós. La curvatura es comúnmente encontrada en el extradós del perfil cuyas características provocan que las partículas de flujo se aceleren en esa zona y, aplicando la ecuación de Bernoulli (Prager, King, & Carlson, 2021), en dos puntos de la misma línea de corriente de flujo no

rotacionales, la mayor celeridad de las partículas en esa zona significará la creación de la zona de menores presiones en el extradós mencionada previamente.

- **Posición de máxima curvatura:** Es la posición en porcentaje de cuerda en la que se encuentra la máxima curvatura del perfil aerodinámico. Cuando un perfil aerodinámico no cuenta con curvatura se dice que es simétrico, por lo tanto, no generara sustentación para ángulos de ataque de 0 grados.

2.2. Ejemplos de perfiles aerodinámicos

2.2.1. Perfiles aerodinámicos tipo NACA

Los perfiles aerodinámicos que parten de la definición descrita en la anterior sección son hasta ahora de los perfiles más populares dentro de las aeronaves, por lo tanto, la regulación y selección de los perfiles fue regulada con intención de mantener estándares a la hora de analizarlos.

En Estados Unidos durante 1915 se fundó la NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) este comité estaba encargado de realizar pruebas y diseños empíricos de perfiles alares. Aunque dicha agencia se disolvió en 1958 para darle paso a la creación de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) trabajo fuertemente en túneles de viento mediante pruebas y diseños empíricos, la regulación de perfiles aerodinámicos. Las regulaciones realizadas son comprendidas en perfiles denominados Familias NACA 1, 4, 5,6 y 7. (Pinzón Paz, 2013)

- **Perfil alar NACA 4 dígitos**

La primera familia de los NACA se conoce como la familia de perfiles de 4 dígitos.

A continuación, se presenta la descripción de dicha nomenclatura utilizando como ejemplo el perfil alar NACA 2412 de 4 dígitos se observa en la Figura 2.2.

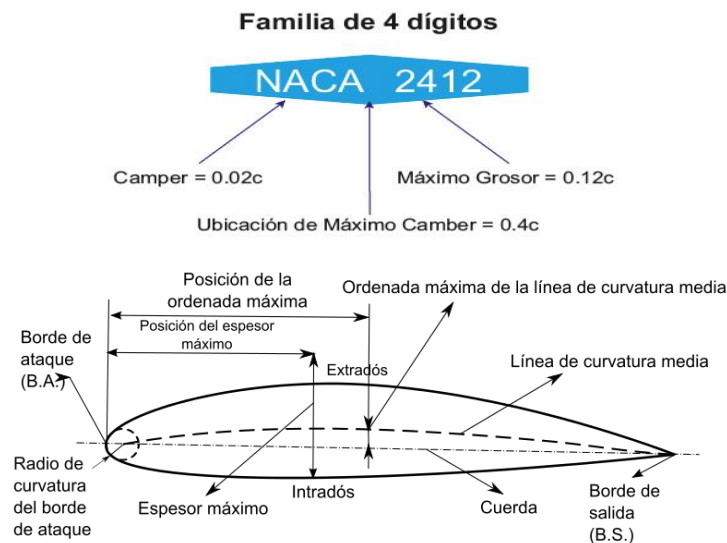


Figura 2.2. Perfil alar Naca 4 dígitos. (Pinzón Paz, 2013)

NACA define el primer dígito como la curvatura (camber) máxima en porcentaje de cuerda. Lo que quiere decir que para el ejemplo de la Figura 2.2 la curvatura máxima es de 2% en longitud de cuerda. El segundo dígito representa la localización de la curvatura máxima en la décima cuerda, lo que quiere decir que para este caso está localizada en el 40% de la longitud de la cuerda medida desde el borde de ataque.

Los últimos dos dígitos determinan el máximo espesor en porcentaje de la cuerda, es importante aclarar que para un perfil alar de 4 dígitos se ubica por defecto al 30% de la cuerda medido desde el borde de ataque. (Pinzón Paz, 2013)

- **Perfil alar NACA 5 dígitos**

Esta fue la siguiente familia en aparecer surgió de experimentos y estudios empíricos con el objetivo de incrementar el coeficiente de sustentación máximo. Los resultados demostraron que si acercaban el punto de máxima curvatura en dirección al borde de ataque se obtenía incremento en el coeficiente de el primer dígito cuando se multiplica por $3/2$ otorgando coeficiente de sustentación local.

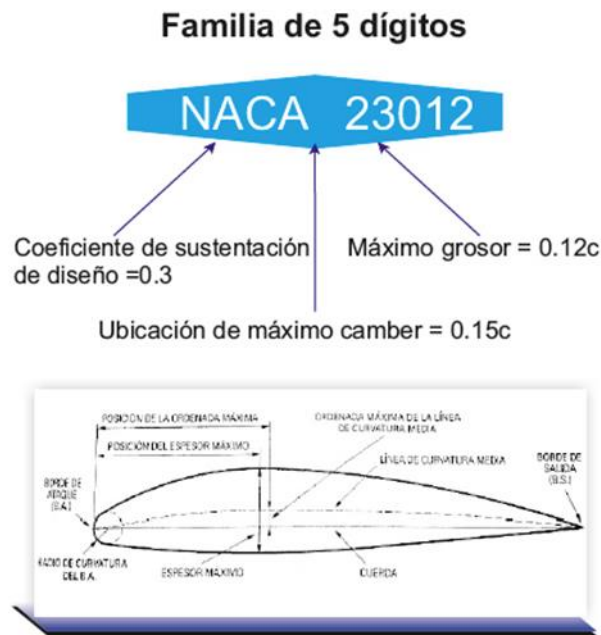


Figura 2.3. Perfil alar Naca 5 dígitos. (Pinzón Paz, 2013)

En la Figura 2.3 se observa que cuando se multiplica por $3/2$ se consigue el coeficiente de sustentación de diseño en decimas el cual es un índice del incremento en la curvatura. El segundo y tercer dígito forman un número que multiplicado por $1/2$ otorga la ubicación de la curvatura máxima en porcentaje de longitud de cuerda. En este caso se tiene el camber máximo al 15% de longitud de cuerda. Los últimos dos dígitos dan el grosor máximo del perfil alar que en este caso es del 12% o $0.12c$ de la longitud de cuerda. (Pinzón Paz, 2013)

- **Perfil alar naca 1 dígito**

El perfil alar serie 1 representó el primer intento de diseñar teóricamente un perfil alar con un tipo de distribución de presión deseado, mantener una presión de gradiente favorable y una capa límite laminar en el proceso.

En la Figura 2.4 el primer dígito identifica la serie, el segundo dígito indica la ubicación del punto de mínima presión en decimas de cuerda medidos desde el borde de ataque. Cabe anotar que la ubicación del punto de mínima presión es analizada no para el perfil con curvatura, sino para un perfil simétrico con la misma distribución de espesor del perfil analizado y al ángulo de ataque correspondiente a cero sustentación o ángulo de ataque cero para el perfil simétrico. Para el perfil NACA 16-212 de la Figura 2.4 este fenómeno ocurre a $0.6c$ o 60% de la longitud de cuerda. El tercer dígito da el coeficiente de sustentación de diseño en décima de cuerda. En este caso el coeficiente de sustentación de diseño es de 0.2. Los últimos dos dígitos otorgan el máximo grosor en porcentaje de la cuerda, que para el NACA 16-212 sería del 12%.



Figura 2.4. Perfil alar Naca 1 dígito. (Pinzón Paz, 2013)

- **Perfil alar naca 6 dígitos**

Es perfil naca con el propósito de fomentar el flujo laminar sobre su superficie minimizando el coeficiente de resistencia.

En la Figura 2.5 se presenta un ejemplo de la familia de 6 dígitos que adicionalmente posee un subíndice donde indica gradientes de presión favorables por abajo y por arriba del coeficiente de sustentación de diseño.

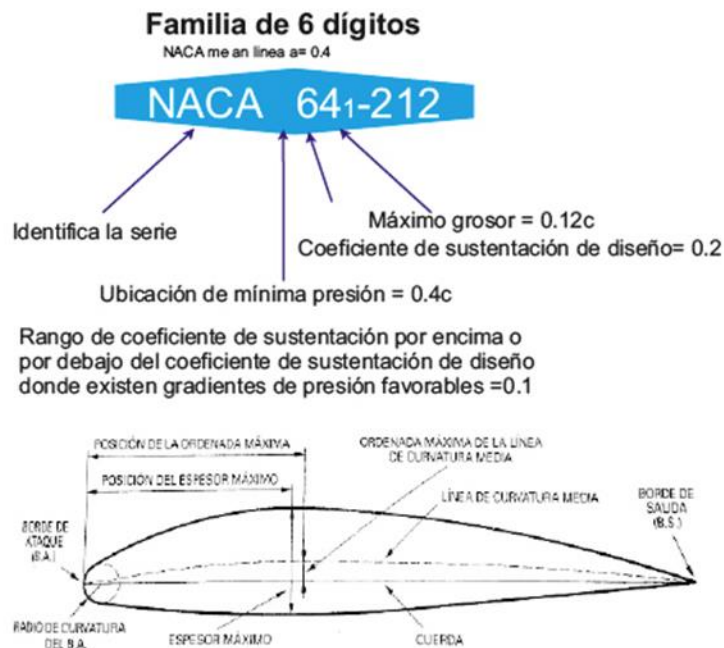


Fig. 3.1.

Figura 2.5. Perfil alar Naca 6 dígitos. (Pinzón Paz, 2013)

El primer dígito identifica la serie, el segundo dígito provee la ubicación del punto de mínima presión en décimas de cuerda medidas desde el borde de ataque. El tercer dígito da el coeficiente de sustentación de diseño en decimas de cuerda y finalmente los últimos dos dígitos otorgan el máximo grosor en porcentaje de la cuerda, que para el ejemplo sería del 12%. (Pinzón Paz, 2013)

- **Perfil alar naca 7 dígitos**

Destacan por su gran extensión del flujo laminar tanto en el intradós como en el extradós. Tienen bajos coeficientes de momento en cabeceo, aunque con coeficientes de sustentación moderadamente altos.

2.2.2. Perfiles aerodinámicos tipo PARSEC

La familia de perfiles PARSEC (Parametric Section) son un tipo de perfil reciente desarrollada en Göttingen por la Agencia Alemana de investigación Aeroespacial a cargo del Dr. Helmut Sobieczky. Esta familia fue definida a partir de los polinomios generados por la geometría de un perfil aerodinámico para ser más exactos el intradós y el extradós. Estas secciones las cuales son definidas mediante un polinomio las componen 11 parámetros distintos los cuales son los siguientes: (RODRÍGUEZ ROMÁN , HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ , & SOTO PALACIOS , 2012)

La familia PARSEC se emplea generalmente en la optimización de alas diseñadas para el régimen transónico, esto debido a la forma en la que están concebidas.

r_{ba} -Radio de curvatura en el borde de ataque

$x_{e\ max}$ -Posición del máximo del extradós

$y_{e\ max}$ -Magnitud del máximo del extradós

$y''_{e\ max}$ -Curvatura en el máximo del extradós

$x_{i\ min}$ -Posición del mínimo del intradós

$y_{i\ min}$ -Magnitud del mínimo del intradós

$y''_{i\ min}$ -Curvatura en el mínimo del intradós

α_{bs} -Ángulo del borde de salida

β_{bs} -Espesor angular del borde de salida

y_{bs} -Posición del borde de salida

Δy_{bs} -Espesor del borde de salida

En el perfil de la Figura 2.6 se puede observar el perfil base de la familia PARSEC.

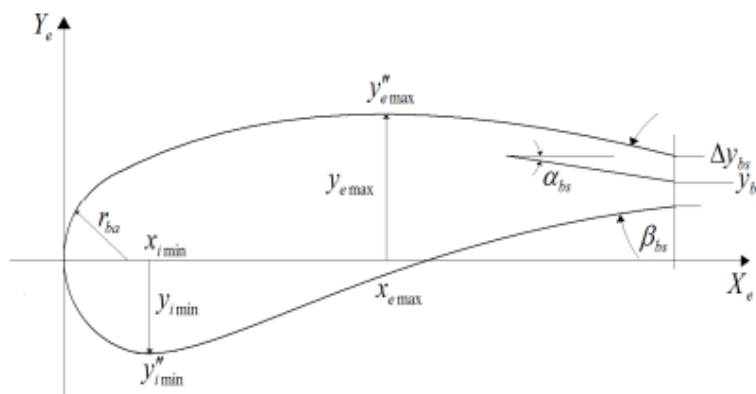


Figura 2.6. Perfil PARSEC. (RODRÍGUEZ ROMÁN , HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ , & SOTO PALACIOS , 2012)

2.2.3. Perfiles aerodinámicos tipo Clark-Y

Los perfiles tipo Clark Y son utilizados en diseños de aeronaves de propósito general y han muy estudiado en aerodinámica a lo largo de los años. El perfil fue diseñado en 1922 por Virginius E. Clark. La superficie aerodinámica tiene un grosor característico del 11,7 por ciento y es plana en la superficie inferior al borde de salida con un valor del 30 por ciento de la cuerda. El fondo plano simplifica la medición de ángulos en hélices y facilita la construcción de alas.

Para muchas aplicaciones, el Clark Y observado en la Figura 2.7. Perfil aerodinámico tipo Clark-Y. ha sido una selección de perfil aerodinámico adecuado; da un rendimiento general razonable con respecto a su relación de elevación contra arrastre, y tiene características de pérdida suaves y relativamente bajas. Pero la superficie inferior plana no es óptima desde una perspectiva aerodinámica y rara vez se usa en diseños modernos. (Piccirillo, 2000)

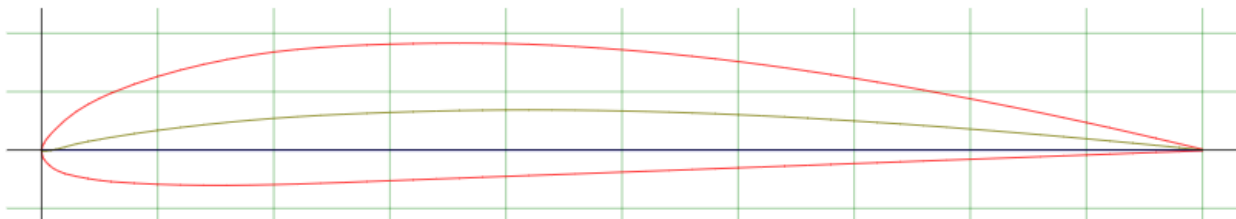


Figura 2.7. Perfil aerodinámico tipo Clark-Y. (Airfoil Tools, 2022)

El Clark Y se ha encontrado con una gran acogida para la construcción de modelos de aviones, gracias al rendimiento de vuelo que ofrece con su flujo de aire por el número de Reynolds medio que contempla. Las aplicaciones en modelos de aviones son muy amplias, desde planeadores de vuelo libre hasta modelos a escala de control de radio multi motor.

El Clark Y que se observa en la es atractivo por su superficie inferior casi plana, que ayuda en la construcción de alas en planos montados. Los modelistas sin experiencia son más capaces de construir modelos de aviones que proporcionan un buen rendimiento de vuelo con características de pérdida relativamente bajas.



Figura 2.8. Clark YH wingroot de un Yak-18T. (Megger, 2022)

2.2.4. Perfiles aerodinámicos Gottingen

La guerra marco bastante la industria aeronáutica esto debido a los constantes avances que presentaban los países durante su enfrentamiento. Algunos bastante más desarrollados que otros dominaban los aires y eso le generaba una ventaja considerable respecto al adversario. Durante la Primera Guerra Mundial, los ensayos realizados en Gottingen contribuyeron al diseño de los primeros perfiles modernos, hasta que, a partir de la Segunda Guerra Mundial, tomó el relevo en los Estados Unidos el Comité Nacional de Aeronáutica (NACA), antecesor de la actual NASA, que ha desarrollado la mayor parte de los perfiles empleados en la actualidad. (Scott, 2004)

Los perfiles Gottingen nacieron en las primeras épocas de la aviación, se podría decir que por esto su número asociado no describe su geometría a su rendimiento, dicho número asociado varía entre 1 y 804 aproximadamente, ya que a medida que se desarrollaba una nueva forma este se le asignaba el número siguiente.

Dada su metodología de construcción las ecuaciones necesarias para calcular las coordenadas de estos perfiles no se encuentran definidas, pero dado el caso, dichos perfiles están asociados a los perfiles tipo NACA por lo que algunas ecuaciones se pueden relacionar para encontrar dichos valores.

Por ejemplo, el Gottingen 622 ubicado en la Figura 2.9 que se muestra a continuación tiene solo un 8 % de grosor con un 2,4 % de camber, mientras que el 625 que se muestra en la Figura 2.10 tiene un 20 % de grosor con un 6 % de camber. (Scott, 2004)

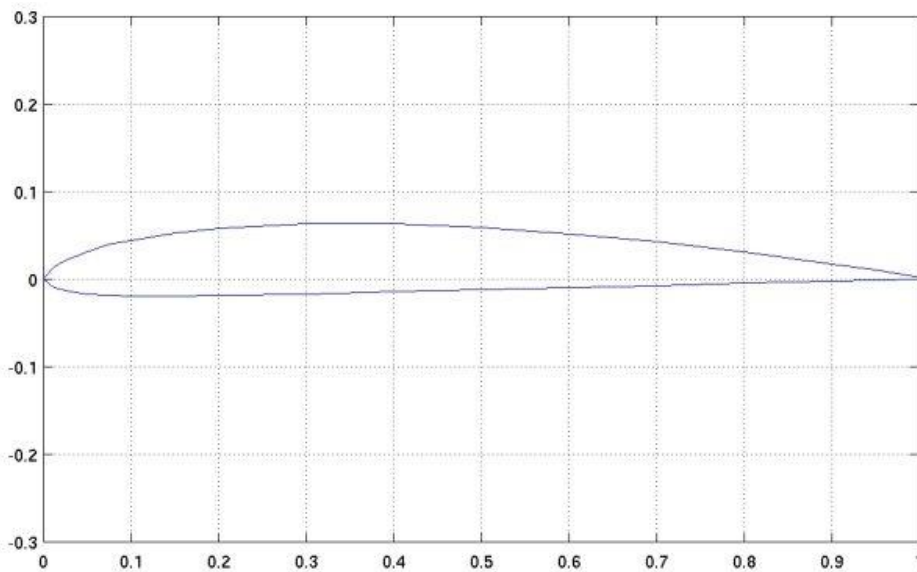


Figura 2.9. Gottingen 622. (Scott, 2004)

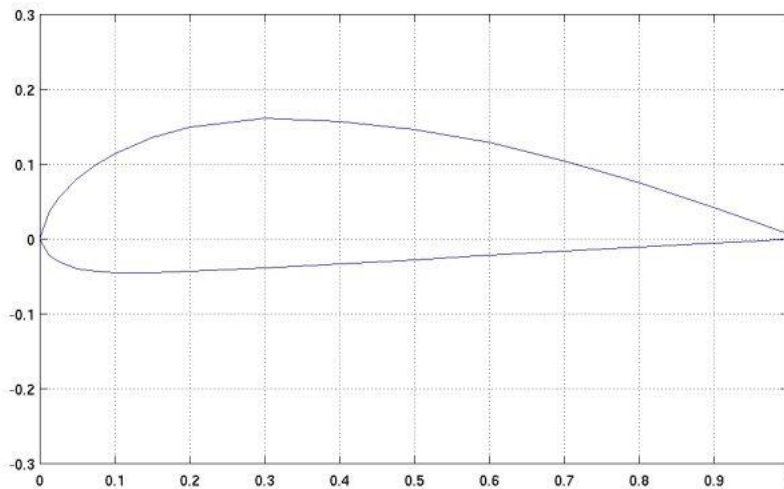


Figura 2.10. Gottingen 625. (Scott, 2004)

2.3. Fundamentos aerodinámicos

2.3.1. Teoría de la aerodinámica

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos y es la ciencia que estudia las reacciones del viento relativo con los objetos que se mueven dentro de este. Cualquier elemento que esté sometido a un flujo tendrá unas fuerzas asociadas en función de la geometría que tenga, las propiedades y velocidad del fluido. Estas fuerzas provienen de la suma entre la aportación de la fuerza generada por la diferencia de presión entre paredes del mismo elemento y las fuerzas viscosas que se generan entre el fluido y el sólido en contacto. Las fuerzas de presión tienen una dirección perpendicular con respecto a la del fluido mientras que las fuerzas viscosas son tangentes al cuerpo. (EcuRed, 2021)

2.3.2. Viento relativo

El conocimiento del viento relativo es particularmente esencial para comprender la aerodinámica del vuelo con alas que puedan girar en su eje, porque el viento relativo puede estar compuesto de múltiples componentes. El viento relativo se define como el flujo de aire que atraviesa un perfil aerodinámico, el viento relativo se crea mediante el movimiento de una superficie aerodinámica a través del aire. A medida que el perfil está en movimiento se crea una resistencia del viento que está atravesando el perfil, según la dirección y el Angulo a la que esta puesta es el sentido del viento relativo. Asimismo, si se cambia el sentido o el Angulo del perfil cambia también la dirección del viento. (Dynamic Flight, 2017)

2.3.3. El principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli tiene una amplia gama de aplicaciones en la ingeniería de dinámica de fluidos, desde el diseño de alas aeroespaciales hasta el diseño de tuberías para plantas hidroeléctricas, ya que en dicho caso desde la elevación desde el embalse en las montañas hasta la planta en la parte más baja de la conexión hidráulica, conociendo la distancia entre ellas ayuda a los ingenieros a conocer la velocidad en la que podría bajar el fluido que atravesarían las turbinas generadoras de energía en la planta, así mismo puede explicar cómo y por qué vuelan los aviones, teniendo en cuenta el inmenso peso que ellos tienen, la respuesta es simple, y es que a medida que el aire fluye alrededor del ala. El avión es empujado hacia arriba por una presión de aire más alta debajo del ala, en comparación con una presión más baja sobre el ala. Pero para comprender este fenómeno más profundamente, se debe mirar una rama de la física conocida como mecánica de fluidos y, en particular, un principio conocido como la ecuación de Bernoulli. Esta ecuación no solo puede predecir la presión del aire alrededor del ala de un avión, sino que también puede usarse para encontrar la fuerza de los vientos fuertes en un rascacielos, la presión a través de un reactor químico o incluso la velocidad del agua que sale de una manguera. (Prager, King, & Carlson, 2021)

2.3.4. Fundamentación del Angulo de ataque

- **Fuerza de sustentación**

La sustentación producida en un ala o superficie aerodinámica es directamente proporcional al área total expuesta al flujo de aire y al cuadrado de la velocidad con que ese flujo incide en el ala. También es proporcional, para valores medios, a la inclinación del ángulo de ataque del eje de la superficie de sustentación respecto al de la corriente de aire. Para ángulos superiores a un rango de límite de grados, la sustentación cambia con rapidez hasta llegar a la pérdida total cuando, por efecto de esos valores, el aire se mueve produciendo torbellinos en la superficie de las alas. En esta situación se dice que el perfil aerodinámico ha entrado en pérdidas. (Zitnik, 1999)

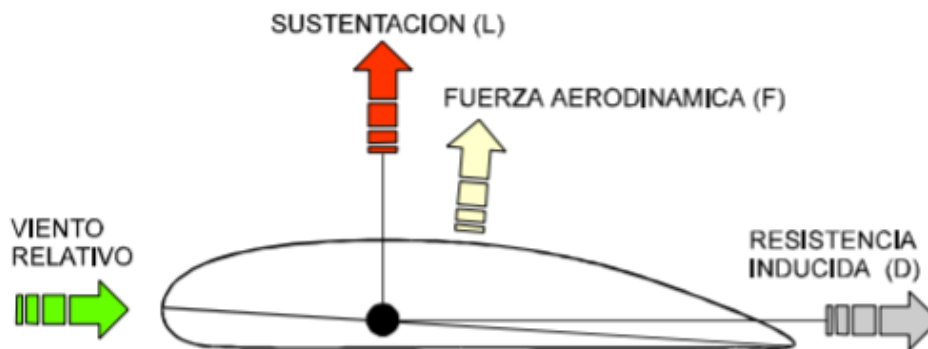


Figura 2.11. Fuerzas que se ejercen en un perfil aerodinámico (ala). (Zitnik, 1999)

Son varias las variables que influyen en la sustentación del avión. Definiendo estas la sustentación del peso y la carga que transportará, algunas están dadas por el diseño, otras por condiciones climáticas y otras las puede variar el piloto, pero en la Ecuación 1, se puede definir un valor matemático para la sustentación.

$$L = \frac{p * v^2 * s * C_f * \text{Cos}(\alpha)}{C}$$

Ecuación 1

Donde L, es la sustentación, p, es la densidad del aire, v, es la velocidad, s, es la superficie alar, Cf, es el coeficiente aerodinámico, y el α es el Angulo de Ataque.

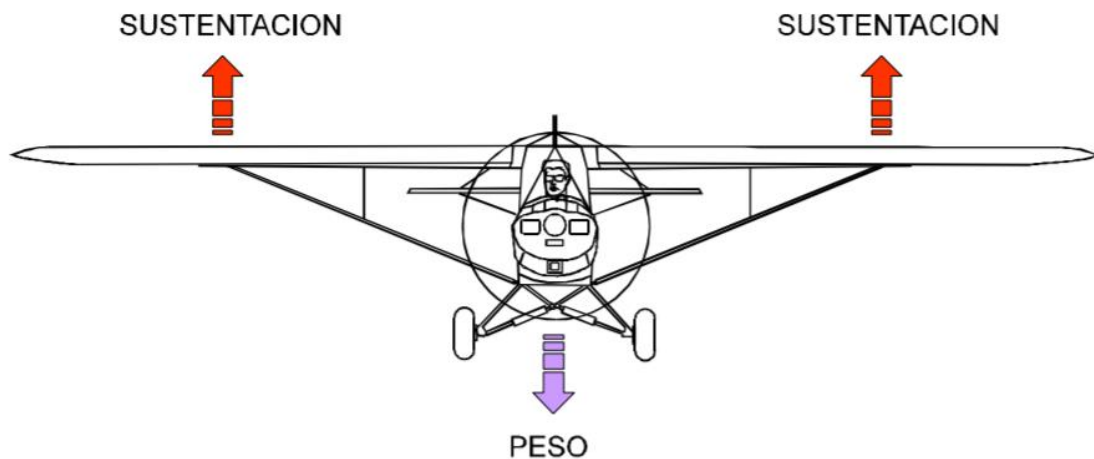


Figura 2.12. Descripción grafica de las fuerzas que se ejercen en el avión y sus respectivas alas. (Zitnik, 1999)

La sustentación contempla su propio coeficiente (C_L) el cual es un numero adimensional que representa la efectividad que posee un cuerpo para generar sustentación a través del aire. Este coeficiente es diferente para cada perfil que se diseñe y no es controlable por parte de la tripulación. Matemáticamente se calcula como:

$$C_L = \frac{L}{0.5 * \rho * V^2 * S}$$

Ecuación 2

Donde L es la fuerza de sustentación, ρ es la densidad del aire, V es la velocidad y S la superficie alar.

Dicho coeficiente se puede ver afectado por el ángulo de ataque de un avión. En la Figura 2.13 se observa como en el momento que el ángulo de ataque aumente, esto mismo

sucedirá para el coeficiente de sustentación el cual cuando llega a cierto punto genera que la aeronave entre en pérdida. (Edae education, 2022)

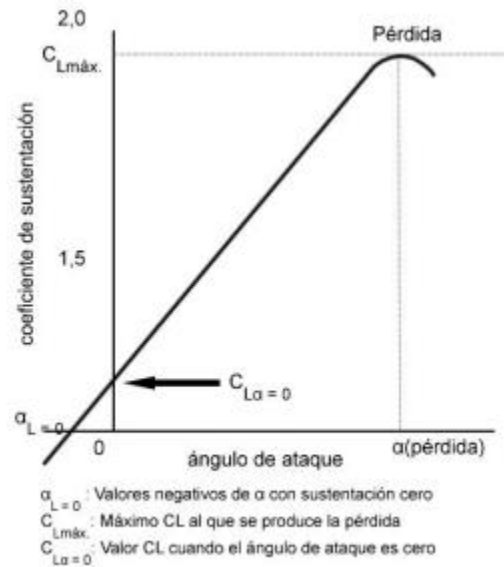


Figura 2.13. Coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque. (Edae education, 2022)

- **Resistencia al avance**

Los mismos factores que contribuyen al vuelo producen efectos no deseables como la resistencia. La resistencia es la fuerza que tiende a retardar el movimiento del avión en el aire. Un tipo de resistencia es la parásita, producida por la fricción del fuselaje, tren de aterrizaje, alerones, etc. Depende de la forma del objeto y de la rugosidad de su superficie. Se puede reducir mediante perfiles muy aerodinámicos del fuselaje y alas del avión, Hay diseños que incorporan elementos para reducir la fricción, consiguiendo que el aire que fluye en contacto con las alas mantenga el llamado flujo laminar cuando se desliza sobre ellas sin producir torbellinos. Otro tipo de resistencias, llamada resistencia inducida, es el resultado directo de la sustentación producida por las alas.

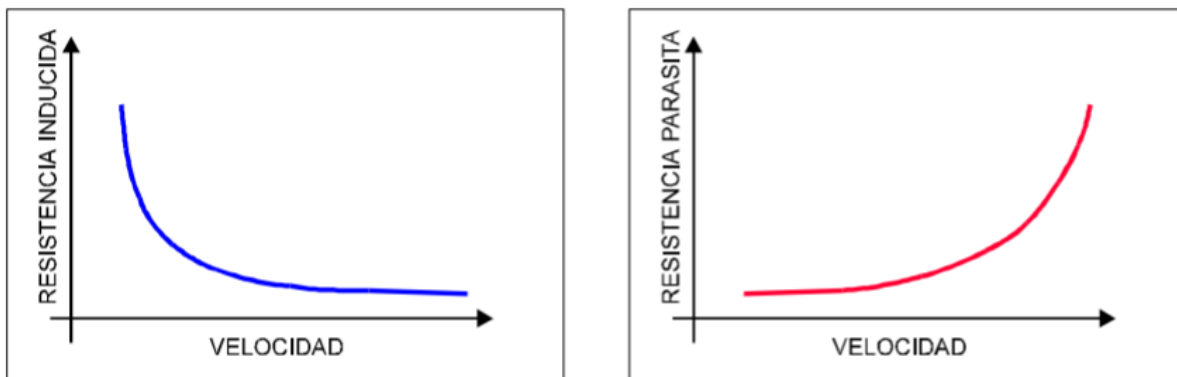


Figura 2.14. Graficas de las 2 resistencias con relación a la velocidad. (Zitnik, 1999)

Se llama resistencia total a la suma de ambas resistencias, el cual en la Figura 2.14 se muestra su comportamiento según la velocidad, la ingeniería aeronáutica trata de conseguir que la relación entre la sustentación y la resistencia total sea lo más alta posible, que se obtiene teóricamente al igualar la resistencia aerodinámica con la inducida, pero dicha relación en la práctica está limitada por factores como la velocidad y el peso admisible de la célula del avión. (Zitnik, 1999)

A pesar de la relación que se busca tener entre la sustentación y la resistencia, sus coeficientes dictaminan definiciones algo diferentes, esto debido a que el coeficiente de la resistencia denominado (C_D) indica numéricamente la tendencia que tiene un cuerpo a generar dicha resistencia. Matemáticamente se puede expresar como:

$$C_D = \frac{2D}{\rho * V^2 * S}$$

Ecuación 3

Donde D es la fuerza de arrastre total, ρ es la densidad del aire, V es la velocidad y S la superficie alar.

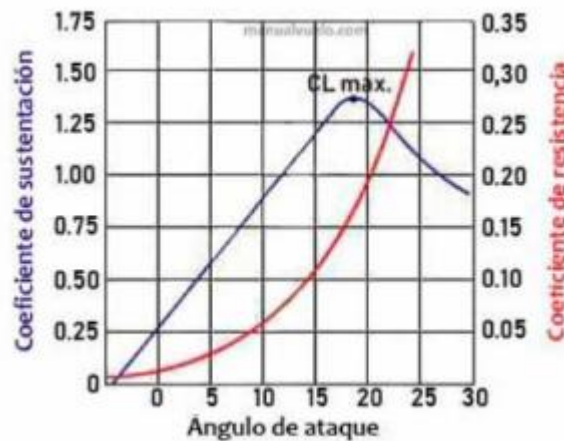


Figura 2.15. Coeficiente de sustentación vs ángulo de ataque vs coeficiente de resistencia. (Edae education, 2022)

La Figura 2.15 describe los coeficientes de resistencia y sustentación ante la variación del ángulo de ataque. Se observa como dicho coeficiente de sustentación llega a un punto crítico y causa la entrada en pérdida de la aeronave.

- **Perdida**

La pérdida es la incapacidad del ala para producir la sustentación necesaria, debido a un ángulo de ataque excesivo. Desde cierto punto en los ángulos excesivos, la sustentación cambia con rapidez hasta llegar a la pérdida total cuando, por efecto de esos valores, el aire se mueve produciendo torbellinos en la superficie de las alas. En esta situación se dice que el perfil aerodinámico ha entrado en pérdida. Durante la aproximación para el aterrizaje, el piloto tiene que ir descendiendo y a la vez disminuyendo la velocidad lo más posible; ellos produciría una considerable pérdida de sustentación y en consecuencia, un descenso muy fuerte y un impacto violento en la pista si no combina correctamente los mando que interactúan en las variables de la sustentación, la explicación más sencilla de la pérdida es considerar que las partículas de aire que rodean a la superficie alar superior, no son capaces de deslizarse por la pendiente que les impone la posición del perfil, generándose torbellinos que impiden la succión sobre la superficie alar como se muestra en la Figura 2.16. (Zitnik, 1999)

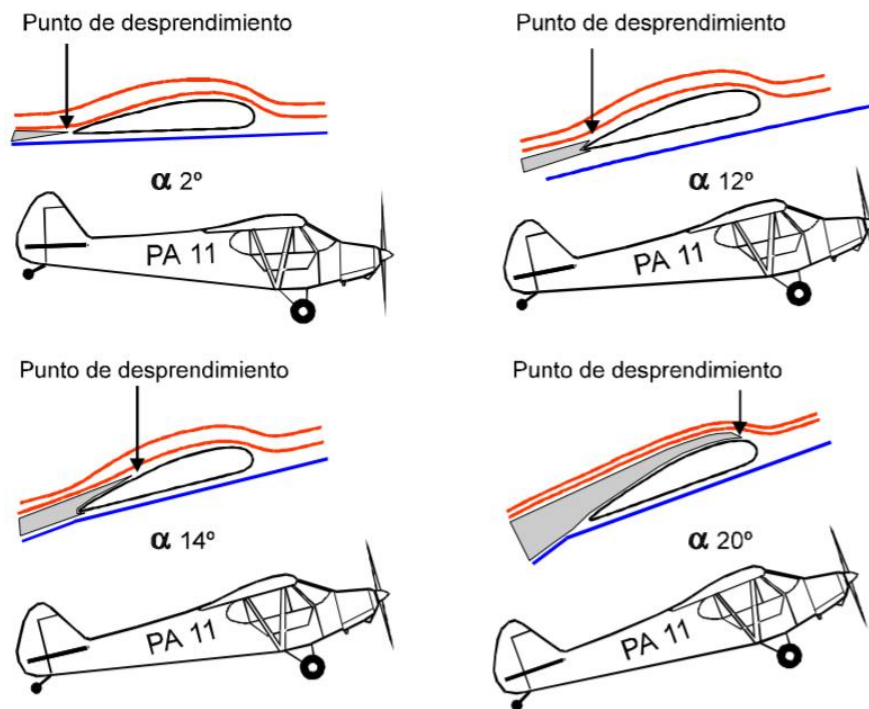


Figura 2.16. Ejemplo de pérdida de sustentación para un avión con respecto al AOA. (Zitnik, 1999)

- **Angulo de ataque**

El ángulo de ataque es el ángulo formado entre el viento relativo y la cuerda aerodinámica. Un perfil aerodinámico entra en pérdida siempre a un mismo ángulo de ataque crítico. Si se supera este ángulo se entra en pérdidas de sustentación debido a la separación del flujo de aire sobre el perfil aerodinámico como se muestra en la Figura 2.17.

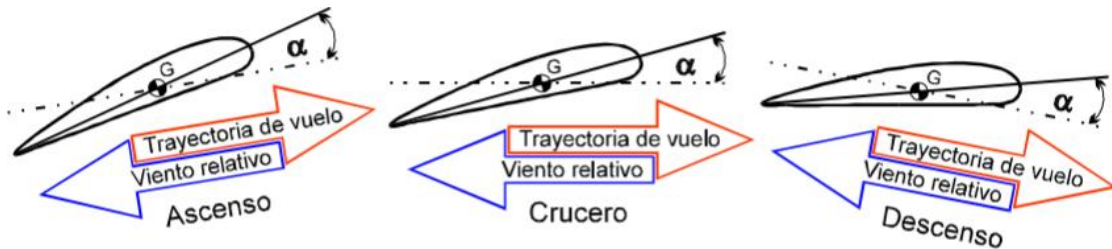


Figura 2.17. Angulo de Ataque en un perfil aerodinámico. (Zitnik, 1999)

La mayoría de los puntos críticos de una aeronave están relacionados con el ángulo de ataque debido a la cantidad de características que dependen de dicho valor, algunas como: la sustentación, la velocidad, la resistencia, la distribución de presiones etc.

Gráficamente en la Figura 2.18 se puede observar la relación del ángulo de ataque y la relación de sustentación - resistencia. Por ejemplo, se logra observar que a los 20° se alcanza el coeficiente de sustentación máximo. Después de estos 20° el ala entra en pérdida. Mientras que a ese ángulo se obtiene un coeficiente de resistencia máximo que puede seguir subiendo conforme se incrementa el ángulo de ataque. La línea verde indica el ángulo de ataque ideal en donde la relación sustentación - resistencia es la óptima, es decir en donde la sustentación es máxima con la mínima resistencia. En este caso se da a lo 6°. (Edae education, 2022)

Ese ángulo en donde el coeficiente de sustentación es máximo y en donde el avión entra en pérdida se le conoce como ángulo crítico. Este ángulo crítico es en donde la capa límite sobre el ala se desplaza hacia adelante y el flujo laminar se convierte en turbulento. (Edae education, 2022)

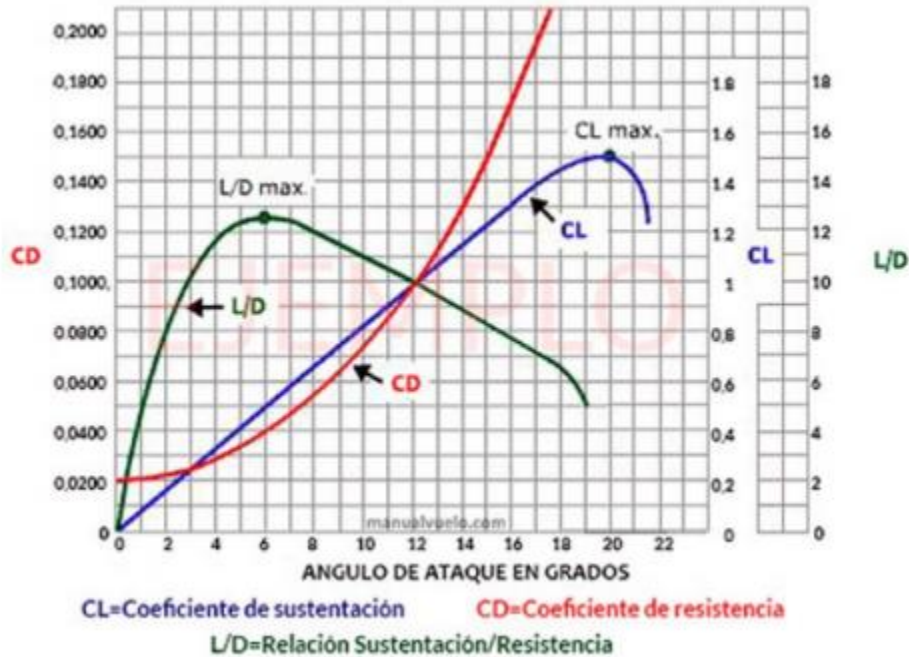


Figura 2.18. Relación del ángulo de ataque y la relación de sustentación - resistencia. (Edae education, 2022)

Para un piloto es importante la percepción del ángulo de ataque ya que se puede dar el caso en el que, si se tiene un ángulo de ataque en el que la aeronave debería estar inclinándose hacia arriba, puede que no se de dicho suceso ya que físicamente el horizonte artificial puede indicar una posición ascendente, pero el avión puede estar perdiendo altura.

Se debe tener claro que la actitud del avión y el ángulo de ataque no es lo mismo. La actitud se mide respecto al horizonte indicando si está nariz arriba o nariz abajo, mientras que el ángulo de ataque se mide respecto al viento relativo.

Adicional al ángulo de ataque se puede encontrar otros ángulos: ángulo de actitud, ángulo de incidencia y ángulo de ascenso/descenso. Matemáticamente lo podemos definir como:

$$°\text{Actitud} + °\text{Incidencia} = °\text{Ataque} + °\text{Ascenso}$$

Ecuación 4

De acuerdo con esta fórmula, en un vuelo recto y nivelado el ángulo de actitud es 0° y el ángulo ascenso es 0°, por lo que en esta condición el ángulo de incidencia sería igual al ángulo de ataque. El ángulo de incidencia es constante, ya que depende del diseño del avión, mientras que los otros ángulos dependen de la operación. (Edae education, 2022)

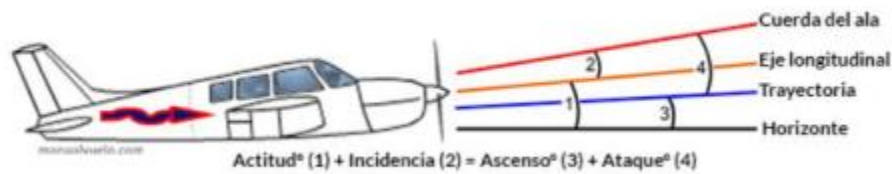


Figura 2.19. Ángulo de ataque en una aeronave. (Edae education, 2022)

- **Centro de presiones**

Es el punto donde se considera ejercida la sustentación, este punto varió según el ángulo de ataque debido a la distribución de presiones. La fuerza va avanzando de posición en dirección contraria a la del fluido a medida que vamos aumentando el ángulo de ataque del perfil como se muestra en la Figura 2.20.

El cambio en la posición del centro de presiones en una aeronave dificulta el análisis de estabilidad de esta, por lo tanto, es mejor utilizar el centro aerodinámico.

El centro aerodinámico de una aeronave es un punto fijo situado en la cuerda del perfil alar. Al trasladar la fuerza de sustentación del centro de presiones al centro aerodinámico se genera un momento, científicamente se ha comprobado que dicho momento permanece constante, sin importancia de que el centro de presiones pueda llegar a variar, por lo que al aplicar la fuerza de sustentación será, mucho más fácil para la aeronave mantener la estabilidad.

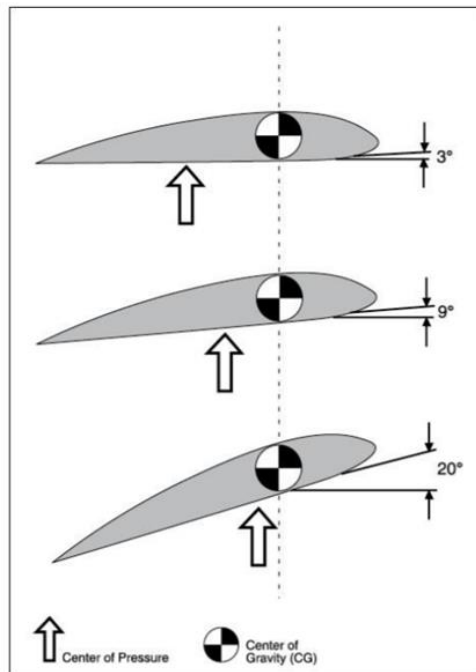


Figura 2.20. Descripción grafica del centro de presiones en un perfil aerodinámico. (Zitnik, 1999)

- **Flujo laminar**

El flujo laminar consiste en un flujo suave y ordenado de aire sobre un perfil en forma de láminas. La pérdida de energía es proporcional a la velocidad media y el perfil de velocidades tiene forma de parábola. El flujo laminar en fluidos suele aparecer en velocidades bajas o viscosidades altas. La capa límite laminar se produce en Reynolds inferiores a $5 * 10^5$. Para obtener el coeficiente de fricción promedio y el espesor de capa límite sobre una placa plana para un flujo laminar se utilizan la Ecuación 5 y Ecuación 6.

$$Cf = 1,33 / Re_x^{1/2}$$

Ecuación 5

$$\delta = 4,91 * x / Re_x^{1/2}$$

Ecuación 6

- **Flujo turbulento**

El flujo turbulento es un flujo caótico y desordenado de aire sobre un perfil sin forma definida. Este se caracteriza por las trayectorias circulares parecidas a remolinos. El flujo turbulento cambia la forma efectiva del perfil y aumenta la resistencia. Esto ocurre con velocidades generalmente muy altas o viscosidades muy pequeñas. La capa límite turbulenta se comprende entre $5 * 10^5 < Re < 1 * 10^7$. Para obtener el coeficiente de fricción promedio y el espesor de capa límite sobre una placa plana para un flujo turbulento se utilizan las Ecuación 7 y Ecuación 8.

$$Cf = 0,074 / Re_x^{1/5}$$

Ecuación 7

$$\delta = 0,38 * x / Re_x^{1/5}$$

Ecuación 8

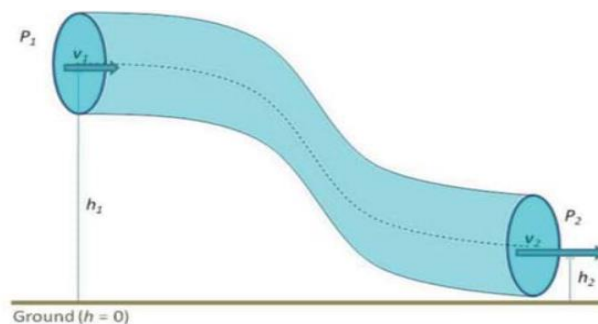


Figura 2.21. Ejemplo de flujo de tubería simple (Prager, King, & Carlson, 2021).

La ecuación de Bernoulli establece que para un fluido ideal (es decir, viscosidad cero, densidad constante y flujo estable), la suma de su energía cinética, potencial y térmica no debe cambiar. Esta restricción da lugar a una relación predecible entre la velocidad (rapidez) del fluido, su presión y su elevación (altura relativa). Específicamente, dados dos puntos a lo largo de una línea de corriente (una línea imaginaria tangente a la dirección del flujo como muestra la Figura 2.21. La Ecuación 9 de Bernoulli:

$$\frac{1}{2}pv_1^2 + pgh_1 + P_1 = \frac{1}{2}pv_2^2 + pgh_2 + P_2$$

Ecuación 9

Donde v es la velocidad del fluido, p es la densidad del fluido, z es la altura relativa y P es la presión.

2.4. Túnel de viento

2.4.1. Definición del túnel de viento

La parte experimental define y demuestra por sí misma la apropiación del concepto relacionado con los fenómenos físicos de manera intuitiva, recolectando información que puede ser analizada a profundidad, en donde posibiliten la determinación de procesos que se puedan desarrollar. La complejidad de realizar análisis a los fluidos y sus consecuencias sobre los cuerpos aerodinámicos es un proceso en el cual se necesita el acople con la aplicación de métodos previos como simulaciones o estudios teóricos en conjunto con la parte experimental ya expuesta y sus beneficios, esto debido a que es importante definir para cualquier diseño el impacto mutuo entre su desarrollo y el futuro campo de aplicación. Si el requisito a aplicar es el rendimiento aerodinámico se realiza todo lo posible para determinar el comportamiento que realizará el fluido ante la presencia del elemento diseñado.

El túnel de viento es esa herramienta experimental necesaria, que cumple con la mayoría de los factores necesarios para ser de los mejores sistemas al momento de analizar un elemento aerodinámico, debido a que cumple con condiciones como: economía de fabricación, precisión de estudios y método rápido de apropiación de conceptos en el marco experimental.

Conformado en este caso por un cuerpo robusto de sección recta arbitraria el túnel de viento acopla 3 cuerpos principales y un motor el cual genera la velocidad del fluido a través de un ducto, continuo a una cámara de ensayo donde se ubicarán los modelos de distintas geometrías y su respectivo sistema de control. (Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica, 2006)

2.4.2. Antecedentes

- **Sistema de control de capa límite para álabes de turbina eólica**

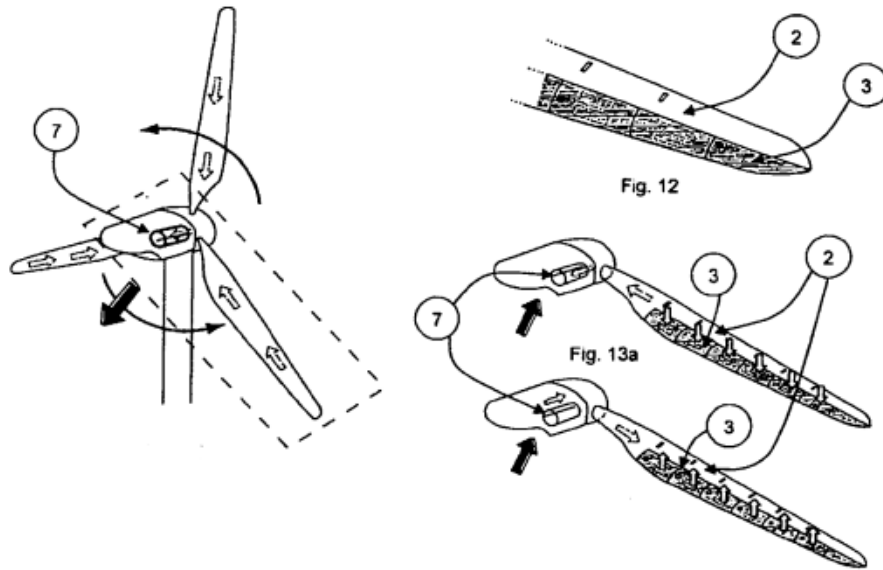


Figura 2.22. Patente sistema de control de capa límite para álabes de turbina eólica. (España Patente nº 07075909 .7, 2011)

Resumen de la invención: El sistema de control de capa límite para los álabes de la turbina eólica como se muestra en la Figura 2.22, proporciona la capacidad de aplicar localmente en la superficie del álabes una aspiración o soplado activa de aire, en función de la carga que momentáneamente actúe sobre el álabes. Mediante aspiración, la carga aerodinámica en el álabes se incrementa localmente y la relación sustentación/resistencia aumenta, mientras que, mediante el soplado perpendicular a la superficie del álabes, la carga aerodinámica disminuye localmente. (España Patente nº 07075909 .7, 2011)

- **Túnel de viento para el estudio de la erosión eólica**



Figura 2.23. Patente túnel de viento para el estudio de la erosión eólica. (España Patente nº 07075909 .7, 2011)

Aunque el túnel de viento es una herramienta con bastante demanda por parte del estudio aeronáutico, existen otros campos el cual usan este elemento para su necesidad, por ejemplo, el estudio de estructuras a escala para la resistencia que se presenta ante el aire, el diseño aerodinámico para un automóvil alcanzar su mayor velocidad, rendimiento y presentar la menor resistencia posible, y como ejemplo principal la presente patente por parte de la Universidad de Almería.

Resumen de la patente: EL Túnel de viento que se presenta en la Figura 2, es para el estudio de la erosión eólica, caracterizado por ser ligero y plegable, donde un ventilador genera una corriente de aire, que entra en una estructura “tubular” desplegable. La estructura es telescópica. Se divide en 3 módulos y se han colocado unas bisagras, que permiten transformarlo en un cubo completamente plegado de reducidas dimensiones. Para completar el conjunto telescópico, se ha diseñado un sistema que permite a las paredes adaptarse a esta estructura, utilizando patines que deslizan sobre un raíl. La recogida y análisis de las muestras, se realiza con 2 sensores: 1. Un láser-scan, que permite la generación de mapas tridimensionales del suelo, antes y después de ser erosionado. 2. Una cámara de visión industrial, que capta imágenes de las partículas fijadas en una serie de placas con adhesivos, colocadas al final del dispositivo. (España, Almería Patente nº P201201028, Sin fecha) **Anteproyecto tec**

- **Métodos y sistema para determinar ángulos de ataque y deslizamiento lateral usando sensores de flujo**

Resumen de la invención: En un aspecto, se proporciona un sistema para determinar el ángulo de ataque (AOA) y el ángulo de deslizamiento lateral (AOS) de un vehículo aéreo. El sistema comprende una pluralidad de sensores de flujo de masa, al menos una parte de los cuales están montados para dar como resultado un diferencial en el flujo de aire a través de los respectivos sensores de flujo de masa de aire, y un controlador electrónico configurado para recibir señales de los sensores de flujo. El controlador está configurado para producir señales eléctricas digitales representativas del ángulo de ataque y el ángulo de deslizamiento lateral para el vehículo aéreo.

En otro aspecto, se describe un método para determinar uno o más de AOA y AOS para un vehículo aéreo. El método comprende recibir datos de flujo de aire de una pluralidad de sensores de flujo de masa de aire, al menos una parte de los cuales están posicionados para dar como resultado un diferencial en el flujo de aire a través de la parte de los sensores, y determinar, usando un controlador, al menos uno del ángulo de ataque y el ángulo de deslizamiento lateral para el vehículo aéreo a partir de los datos de flujo de aire recibidos. (Brooklyn Center Patente nº 20070251313, 2007)

2.4.3. Partes del túnel de viento

El diseño de un túnel de viento parte desde la utilización necesaria dependiendo de su fin, esto regulará el número de secciones transversales con el que se cuenta o el tipo de diseño requerido para su construcción. No obstante, la mayoría de estos cuentan con cuatro componentes o elementos comunes que constituyen la base de cualquier modelo.

- **Modelo general del túnel de viento**

Explicada cada una de sus partes y su importancia es importante reconocerlas y tener en cuenta elementos como el efusor y difusor las cuales son importantes para la parte de funcionalidad, paralelo a la parte experimental que propone el habitáculo. Todo con el fin de mantener y asegurar que el flujo mantenga las características de velocidad óptimas, del cual la Figura 2.24 nos da una descripción grafica del túnel de viento desde el cual se guía para la construcción del proyecto. (C.A Quispe Gonzales*, 2014)

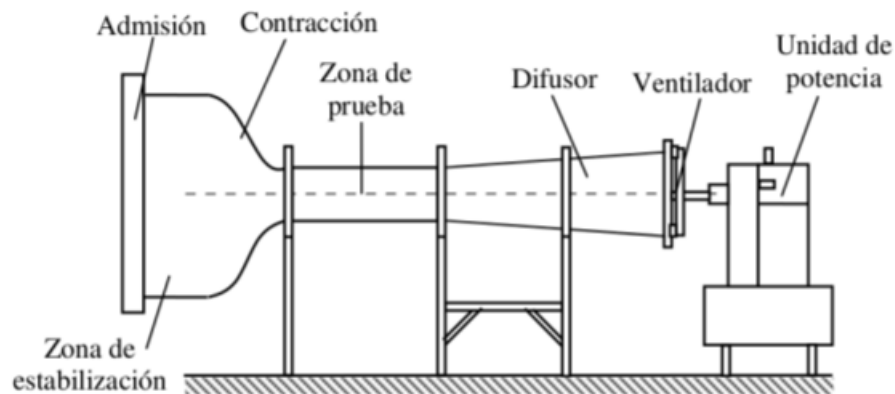


Figura 2.24. Descripción grafica general de un túnel de viento sus respectivas partes. (C.A Quispe Gonzales*, 2014)

- **Zona de acondicionamiento de flujo**

Esta sección tiene como fin brindar al flujo las características necesarias para que este sea de una alta calidad y acorde a los experimentos a realizar, esto con el fin de controlar los parámetros importantes como lo son: dirección, perfil de velocidades, turbulencia, etc.

Esto se consigue principalmente teniendo en cuenta la estructura del túnel y el sistema de control del fluido, para esto es utilizado un ventilador en el cual cuya potencia dependerá principalmente del tamaño o de la cantidad necesaria de fluido que atraviesa la sección transversal de un túnel de viento, acompañado de esto será necesario tener en cuenta el control de dicho fluido el cual contará con una turbulencia, pero para esto se utilizan elementos que puedan controlar dicha turbulencia, los dispositivos comúnmente utilizados son:

Panel de abejas (Honeycombs): Estructura mallada la cual cuenta con orificios tipo panel de abeja cuya función es dotar al flujo de la dirección deseada utilizando dicha disposición de filamentos paralelos, como se muestra en Figura 2.25.

Pantallas de turbulencia: Son dispositivos especiales capaces de uniformar el fluido a costa de una considerable pérdida de presión y generación de pequeñas turbulencias. (Mejia, 2012)

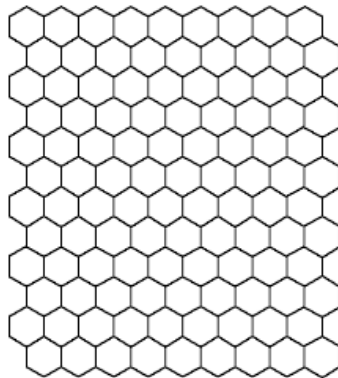


Figura 2.25. Forma de Panel de abeja, Estructura mallada. (Mejia, 2012)

- **Efusor**

Esta sección es comúnmente ubicada entre la zona de acondicionamiento y el habitáculo, es también reconocida como tobera convergente o cono de contracción. Su misión principal es dar al flujo las características necesarias para la prueba, como lo serían la velocidad y dirección mediante una reducción considerable y gradual de su sección transversal, produciendo así una aceleración en el fluido que conlleva a la velocidad esperada o solicitada por el operador. Se observa mediante la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales, que el incremento de velocidad a la salida de esta sección va acompañado de una reducción de presión de esta, pero aumentando considerablemente la velocidad como fue expuesto anteriormente. La relación de contracción del efusor (C) se define como en la Ecuación 10.

$$C = \frac{S_h}{S_a}$$

Ecuación 10

Donde S_h y S_a Son las secciones del habitáculo y la zona de acondicionamiento de flujo respectivamente. (Mejia, 2012)

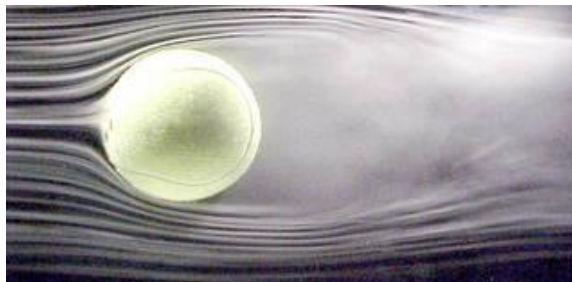
- **Difusor**

Partiendo de lo anteriormente explicado en el efusor, esta sección continúa al habitáculo no solo está ubicada opuestamente con el efusor, también cuenta con la característica de realizar la tarea opuesta a este, ya que es el encargado de aumentar la presión y disminuir

la velocidad del fluido mediante un aumento de su sección transversal, generando así la posibilidad de utilizar un motor, el cual también está ubicado al final de esta zona de una potencia menor debido a las propiedades físicas expuestas. (Mejia, 2012)

- **Cámara de ensayo**

Sección vital del túnel de viento encargada de acondicionar los elementos necesarios para realizar la prueba (Figura 2.26), también conocido como, habitáculo o sección de prueba puede ser la parte más importante del túnel de viento al momento de realizar los experimentos. Sus parámetros de diseño parten de los requerimientos necesarios para la práctica, partiendo de la accesibilidad y la visibilidad al modelo a analizar los modelos, esto con el fin de facilitar procesos de evaluación controlando la cantidad de fluido que circula a través de dicha cámara. Debido a la cantidad de características solicitadas para esta sección del túnel de viento, lo más común es la utilización de una sección de geometría rectangular, debido a que facilitan la distribución u operación, además de que su superficie interna no cuente con rugosidad significativa, consiguiendo como resultado que la presión dinámica del flujo y las variaciones de velocidad no superen el 50% y el 25% de sus valores promedios, respectivamente. (Mejia, 2012)



*Figura 2.26. Una prueba del túnel de viento muestra cómo se mueve una pelota de tenis por el aire.
(NASA TV, 2017)*

2.4.4. Clasificación

La construcción y diseño de un túnel de viento partirá principalmente desde su fin de estudio y presupuesto por lo tanto existen múltiples tipos de criterios para que estos puedan ser clasificados, teniendo en cuenta sus características, no obstante, habrá dos características que destacan entre todas las cuales serán: Rango de velocidades de operación y topología física.

- **Velocidad de flujo en el túnel de viento**

Teniendo en cuenta la velocidad del flujo a su paso por el habitáculo, los túneles de viento pueden clasificarse como la Tabla 1:

Tipo	Velocidad Operativa
Baja velocidad	$M < 0.6$
Subsónicos	$0.6 < M < 0.85$
Transónicos	$0.85 < M < 1.2$
Supersónicos	$1.2 < M < 5$
Hipersónicos	$5 < M$

Tabla 1. Clasificación de las velocidades en un túnel de viento. (Mejía, 2012)

Es importantes tener en cuenta que a valor superior de 0.85 Mach las características de la infraestructura se quedan bastante afectadas debido a la cantidad de ondas de choque que perturban el flujo, complicando completamente el análisis aerodinámico, dando como resultado un análisis de estudios más complejo con respecto a sistemas de baja velocidad y subsónicos. (Mejía, 2012)

- **Numero de mach**

En un espacio que puede ser cerrado como lo es un túnel de viento es importante tener presente la velocidad a la que el fluido puede llegar por lo tanto el austriaco Ernst Mach (1838-1916) propuso el número Mach (M), conocido en el uso coloquial como mach, es una medida de velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse según la Ecuación 11.

$$M = \frac{v_s}{C}$$

Ecuación 11

Siendo v_s la velocidad de la fuente respecto al aire y C la velocidad del sonido. (Mejía, 2012)

- **Topología física**

Dependiendo de la conexión física entre las estructuras de un túnel de viento, se pueden clasificar dependiendo del tipo de entorno o el habitáculo que se ocupe como características principales.

- **Circuito abierto**

El flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria recta, este atraviesa completamente el cuerpo del túnel desde el exterior y a través del efusor que suele

albergar la zona de acondicionamiento en su parte inicial. En el efusor pierde presión y gana velocidad, entrando posteriormente al habitáculo. A continuación, llega al difusor donde gana presión y pierde velocidad, para finalizar en la zona de propulsión y alcanzar su destino final que sería la sección de salida. (Mejia, 2012)

Sus principales ventajas son:

- a. Consta de instalaciones menores con respecto al circuito cerrado.
- b. Posibilidad de utilizar técnicas de visualización del fluido con humo debido a la facilidad de acceso al fluido.

Sus desventajas radican en:

- a. Acondicionamiento del flujo influido por el entorno en donde está instalada la estructura.
- b. Mayor consumo de energía para velocidades altas.
- c. Contaminación acústica

- **Circuito cerrado**

El flujo de aire que circula por su interior describe una trayectoria cerrada por el interior del túnel, recirculando de forma continua por el circuito, con poco o ningún contacto con el exterior. (Mejia, 2012)

Sus principales ventajas son:

- a. Menor consumo energético al aprovechar la recirculación del fluido. Este punto es muy importante para cuando se aplican operaciones con el fluido muy elevadas.
- b. Alto control en la calidad del flujo al interior del circuito, es decir, poca o ninguna influencia del exterior sobre el entorno de la instalación del fluido.

- **Según configuración del habitáculo**

Para la configuración del habitáculo se encuentran dos tipos de secciones. La sección abierta en alguno de los límites de la cámara de ensayo comunicara con el exterior y para la sección cerrada, el habitáculo posee paredes solidas que aísla el fluido interno del circuito con el exterior.

La sección cerrada es la configuración de habitáculo más común. Sin embargo, según el tipo de retorno y la configuración de dicho habitáculo, genera una instalación en concreto para cada túnel, dichos túneles se pueden clasificar por su topología física como la

Configuración de habitáculo/Retorno	Circuito abierto	Circuito Cerrado
Sección abierta	Tipo Eiffel	Tipo Prandtl
Sección Cerrada	Tipo NPL	Tipo Göttingen

Tabla 2. Tipo túnel de viento según su topología física (Mejia, 2012)

Dadas sus características, los túneles de tipo Eiffel deben instalar mecanismos de control de flujo, que impidan una mayor entrada de aire al circuito por el habitáculo que por la propia sección de entrada diseñada con tal fin. Las instalaciones de tipo NPL, por su parte, suelen presentar graves problemas de fluctuación de flujo que requieren de cuidadosos diagnósticos post construcción y medidas correctoras. (Mejia, 2012)

2.5. Procesos de manufactura

Por definición un proceso de manufactura se refiere a el conjunto de actividades que de manera precisa son efectuadas para que se lleve a cabo la transformación de las características originales de una materia prima y obtener así el producto final. Estas modificaciones van desde la consistencia, dimensiones, firmeza, estructura y hasta temas estéticos que lo beneficien. Aunque es más conocido como proceso de manufactura, se le llama de igual forma como proceso de producción, proceso de fabricación o proceso industrial. (SDI INDUSTRIAL , 2021)

En la industria aeronáutica los procesos de manufactura han sufrido los mismos cambios que muchas industrias, las exigencias a nivel de capacidad de construcción genera que la velocidad de los procesos aumentara y con esto la optimización de estos, la industria aeronáutica se ha actualizado a procesos mucho más eficientes y relativamente económicos. Una combinación de procesos de manufactura puede generar una mejora significativa no solo en tiempo, si no en resistencia mecánica de los elementos fabricados.

2.5.1. Manufactura aditiva (MA)

La manufactura aditiva (MA), coloquialmente conocida como impresión 3D es un método de producción que consiste en fabricar objetos previamente modelados, mediante la deposición de capa por capa de material, hasta conformar un objeto tridimensional.

La MA es fuertemente utilizada en la industria para el prototipado rápido de piezas, el cual es utilizado como proceso intermedio entre la realización o comercialización de las piezas.

El proceso de construcción del objeto deseado se realiza a partir de un modelo en 3D hecho por CAD el cual es exportado a una máquina de manufactura aditiva, la cual a su vez lo “descompone” en una cantidad finita de capas y posteriormente realizará la adición de un material que entre los más populares están: plástico, metal y cerámica; capa por capa hasta completar el diseño exportado. (Orozco, 2019)

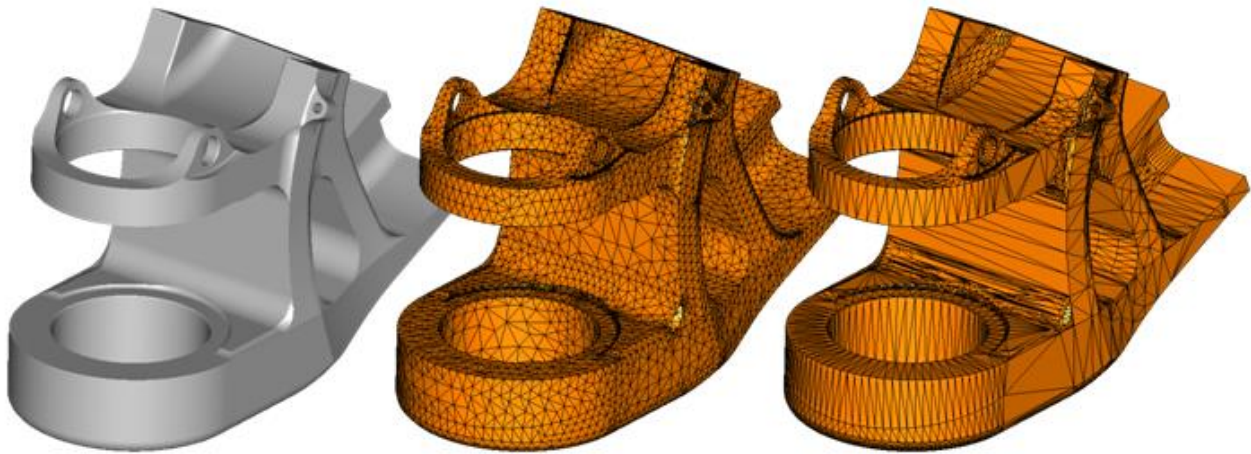


Figura 2.27. Manufactura aditiva. (ITI, 2022)

La manufactura aditiva ha transformado la industria y ha llevado el prototipado a un alto nivel, algunas de sus ventajas son:

- **Libertad de diseño:** Construir piezas de alta complejidad geométrica no son problema para este tipo de proceso
- **Personalización:** Modificación a proyectos ya realizados, sea en dimensiones o características.
- **Producción:** Se pueden producir piezas por lotes o de manera unitaria sin afectar la rentabilidad de la empresa y a una rapidez considerable.
- **Costos:** Los costos de este tipo de procesos son considerablemente mas bajos con respecto a otros tipos de procesos de manufacturas.

2.5.2. Categorías de la manufactura aditiva

El término manufactura aditiva engloba varias tecnologías incluidas los subconjuntos como lo son Prototipado Rápido (RP), Impresión 3D, Manufactura Digital Directa (DDM), manufactura de capas y fabricación aditiva. Sin embargo, una reciente estandarización de actividades de la ASTM (American Society for Testing and Materials) y la ISO (International Organization for Standardization) reúne todos los procesos de manufactura aditiva en siete grandes categorías o familias que son:

- **Fotopolimerización:** Este proceso goza de alta precisión y permite realizar figuras complejas con un acabado superficial suave. El material utilizado en estos procesos son resinas foto curables UV. Esta resina que además debe ser líquida fotopolímera es curada mediante exposición selectiva a la luz, la cual inicia el proceso de polimerización y solidifica las zonas expuestas. (Orozco, 2019)

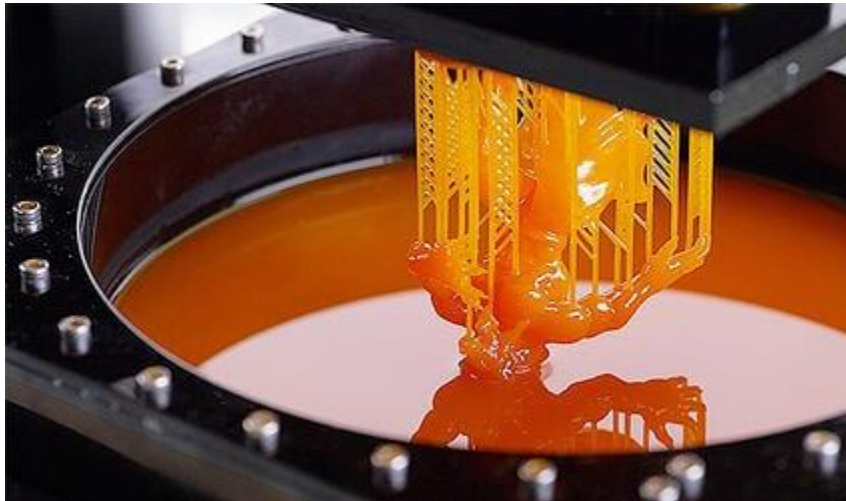


Figura 2.28. Fotopolimerización. (S., 2017)

- **Fusión de lecho de polvo:** Consiste en un depósito de materiales en forma de polvo, estos materiales son selectivamente consolidados al fundirlos juntos, empleando una fuente de calor, como un láser o un rayo de electrones. El polvo que no se funde, rodea la pieza y funge como material de soporte para características adicionales. Entre sus características permite la fabricación de formas complejas, además contempla un amplio rango de materiales como plásticos, metales, cerámicos y arena. (Orozco, 2019)

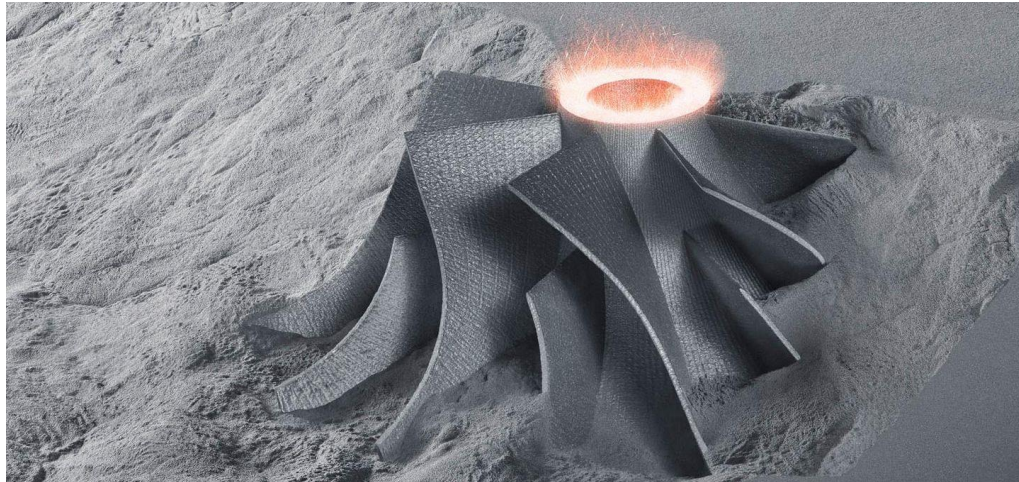


Figura 2.29. Fusión de lecho de polvo. (Orozco, 2019)

- **Inyección de aglutinante:** Una serie de elementos líquidos los cuales contienen materiales orgánicos e inorgánicos son selectivamente aplicados en finas capas de materia en polvo con el fin de construir las piezas capa por capa. Además, por lo general las piezas metálicas o cerámicas son llevadas a un horno luego de ser impresas. Este método permite la impresión a color, además que maneja un amplio rango de materiales como plásticos en polvo, metales, cerámicas, vidrio y arena. (Orozco, 2019)



Figura 2.30. Inyección de aglutinante. (Exone, 2022)

- **Inyección de material:** Consiste en un inyector que deposita material, capa por capa hasta fabricar la pieza. El inyector aplica materiales fundidos que luego se solidifican a temperatura ambiente. Permite la impresión de piezas a todo color y permite la incorporación de varios materiales en una misma pieza, sin embargo, los materiales se ven limitados a polímeros, fotopolímeros y ceras. (Orozco, 2019)

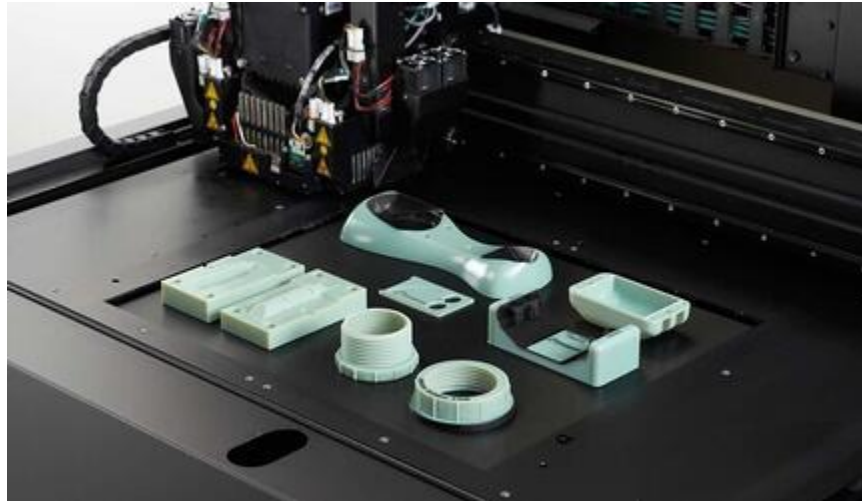


Figura 2.31. Inyección de material. (Kauppila, 2022)

- **Laminación de hojas:** En este proceso las láminas de material son apiladas y laminadas en conjunto para formar un objeto. El proceso de laminación puede ser adhesivo o químico, soldadura ultrasónica o soldadura de bronce según el material que se está laminando. Posteriormente las zonas que no se necesitan son cortadas, capa por capa y eliminadas luego de que el objeto está concluido. (Orozco, 2019)

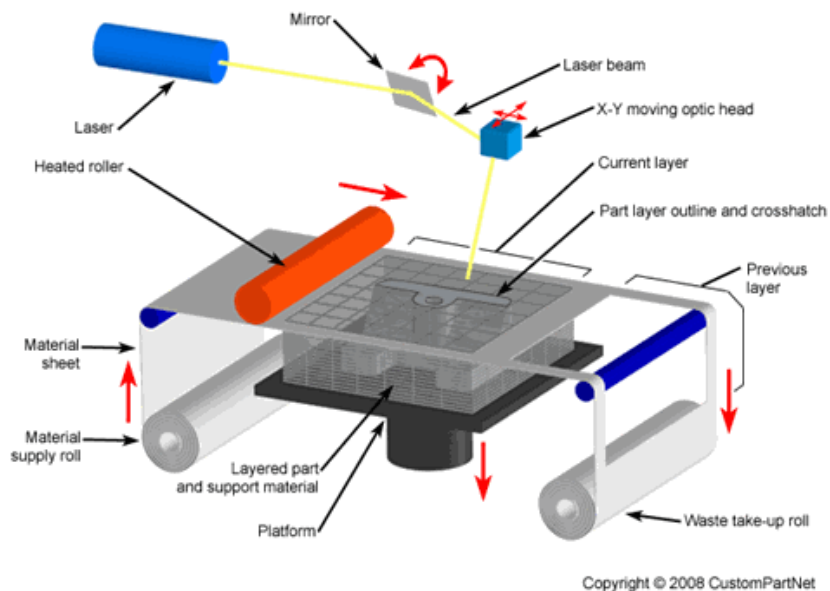


Figura 2.32. Laminación de hojas. (Custom Part, 2022)

- **Extrusión de material:** De los más populares a día de debido a la gran cantidad de impresoras 3D, este proceso realiza la extracción del material a través de un cabezal y se va colocando capa por capa hasta finalizar la pieza. Debido lo mencionado anteriormente acerca de su popularidad, bajo costo y portabilidad es de los sistemas mayormente utilizados en escuelas y oficinas, además permite la

impresión en una gran variedad de colores y el producto final posee buenas propiedades estructurales. Los materiales empleados son filamentos termoplásticos y pellets (FFF) así como líquidos especiales en jeringas. (Orozco, 2019)



Figura 2.33. Extrusión de material. (S, 2017)

- **Deposición directa de energía:** En este proceso o categoría los materiales en forma de polvo o alambre son alimentados en una superficie donde se van adhiriendo mediante una fuente de energía como un rayo láser o un haz de electrones. Se puede decir que es una forma de soldadura. Una de sus principales características es que no tiene limitaciones de dirección o ejes, además que es efectivo para reparaciones o adiciones de material y se pueden trabajar múltiples materiales en una sola pieza. No obstante, los materiales con los que trabaja se limitan a metales (en polvo o alambre) y cerámicos. (Orozco, 2019)

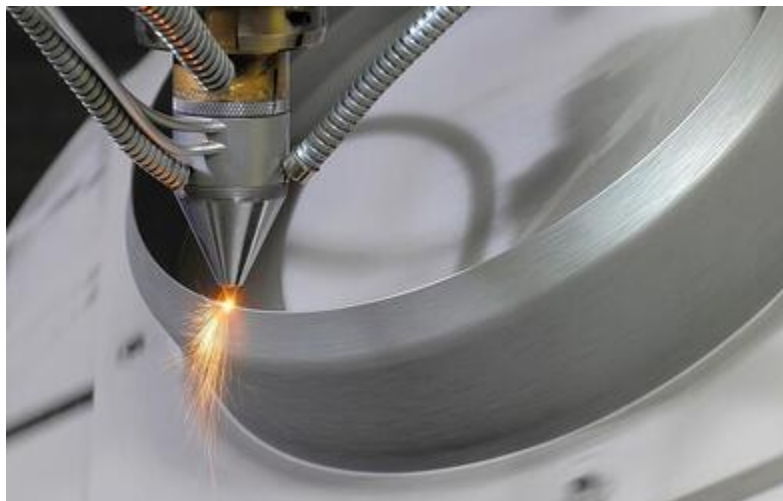


Figura 2.34. Deposición directa de energía. (Jackson, 2018)

2.5.3. Pintura electrostática

La reutilización de las materias es una práctica que tiene mucha fuerza en la industria, esto promueve el menor gasto de materia prima y la mayor productividad posible, la pintura electrostática es pionera en esto, ya que permite un ahorro de hasta el 97% al momento de aplicarse su mezcla homogénea de cargas minerales, pigmentos y resinas de forma sólida, en forma de partículas finas en los metales. (Axalta Coating Systems , 2022)

La pintura electrostática es un proceso físico básico que se basa en la conducción de cargas eléctricas a través de un campo electrostático, la pistola es la encargada de cargar eléctricamente la pintura y dispararla hacia el campo electrostático, debido a esto cada partícula de pintura busca donde descargarse y esto por supuesto se debería de realizar en la pieza metálica a ser pintada, la cual es cargada opuestamente a la pintura y por lo tanto proceder a adherirse. (Loaiza Corvoda, 2010)



Figura 2.35. Pintura electrostática. (Axalta Coating Systems , 2022)

2.5.4. Circuito impreso (PCB)

Una PCB (printed circuit board) o circuito impreso es una placa o plancha rígida de material aislante cubierta de cobre en la cual se realizan unas pistas las cuales sirven de conexión entre los distintos componentes que se montaran sobre ella. La materia prima que se utiliza comúnmente en la placa es fibra de vidrio, teniendo en cuenta que dicha fibra de vidrio es aislante, se utiliza la plancha de cobre como material conductor el cual dependiendo de la placa puede ir protegido por una capa de resina fotosensible se puede visualizar en la Figura 2.36, como está compuesta. (Fernandez de Dios & Caride Ulloa, 2022)T









Vista lateral		
		
		
		
Descripción partes		Proteccion plastica
		Resina fotosensible
		cobre
		Fibra de vidrio

Figura 2.36. Composición PCB. (Autores)

Hay varios tipos de procedimientos al momento de realizar una PCB, comúnmente si se necesita realizar una alta cantidad de placas se contacta con empresas especializadas ya que los métodos caseros no concluyen con una confianza al momento de realizarse y de probar posteriormente los elementos, ya que tienden a tener fallos en el diseño manual, es decir no tendrán una calidad en la Figura 2.37.



Figura 2.37. Demostración de una PCB. (Fernandez de Dios & Caride Ulloa, 2022)

Aunque todos los procesos son manuales, la automatización del proceso dará mejores resultados de conductividad de los elementos, algunos métodos automatizados y no automatizados son:

- **Impresión serigráfica:** Se utilizan químicos los cuales son resistentes al grabado, después se retira el cobre excedente.
- **Fotograbado:** Se utiliza una técnica especial denominada fotomecánica la cual junto con el grabado químico elimina la capa del sustrato. Usualmente se utiliza una foto plóter cuando se utiliza la fotomecánica gracias a los datos producidos por un programa para el diseño de circuitos impresos.

- **Impresión en material termosensible:** Uno de los métodos caseros más utilizados cuando se desea realizar una sola placa o se realiza un prototipo de un circuito impreso. Se transfiere el calor a la placa de cobre usando un papel denominado glossy(fotográfico) el cual tiene impreso el circuito.
- **Fresado de circuitos:** Utiliza fresas mecánicas de 2 o 3 ejes para quitar el cobre del sustrato o plancha. Un programa genera posiciones X, Y, Z para todo el circuito gracias a los programas de diseño, como si fuera un plotter, la maquina comúnmente utilizada que es una CNC realiza el diseño importado sobre la placa.

2.5.5. Sistemas de control

Controlar un sistema es algo básico para la industria, saber que se maneja, como se maneja y que ese “algo” depende de otro “algo” para funcionar de manera escalonada o para parametrizar un proceso es muy importante para los sistemas de control. El control automático se ha convertido en parte importante e integral de los procesos de manufactura e industriales modernos.

Por definición un sistema de control consiste en la selección de los elementos de manera arbitraria o específica, que aplicados a un sistema fijo hagan que este se comporte de una manera determinada. Entonces podemos decir que los sistemas de control consisten en seleccionar, para un sistema dado, una entrada que haga responder a la planta de una manera deseada; esto es, que se obtenga una salida con cierta característica. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007)

Los sistemas de control contemplan una estructura básica la cual permite diferenciarlos rápidamente sin embargo hay ciertos conceptos que contemplan ser especificados.

- **Planta:** Para los sistemas de control una planta se define como un objeto físico cualquiera, que pueda ser controlado.
- **Proceso:** Los procesos son para el control un conjunto de pasos o una operación que contenga una secuencia determinada en su producción y que tienen un determinado proceso final el cual haya sido controlado.
- **Entrada de un sistema:** Es una variable del sistema elegida de tal manera que se la utiliza como excitación de este, la cual mediante su manipulación logra que el sistema cumpla un objetivo determinado.
- **Salida de un sistema:** Es una variable del sistema elegida de tal modo que se la utiliza para analizar los efectos que produjo una excitación en la entrada de este, además de analizarse mediante su estudio final si el sistema cumple o no con los objetivos propuestos.
- **Realimentación:** es una propiedad de los sistemas que permiten que la salida del sistema o cualquier variable de este sea comparada con la entrada al sistema o con

cualquier elemento del sistema, cuando un sistema de control es realimentado, este tiende a reducir las diferencias entre la entrada y la salida del sistema.

- **Perturbaciones:** es una señal que tiende a afectar adversamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se le denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema.

Las definiciones anteriores permiten adentrar en un tema muy importante del control, las perturbaciones y realimentaciones de un sistema definen la complejidad de este, para la solución a dichos problemas se pueden utilizar dos tipos de control. Control en lazo abierto y lazo cerrado.

- **Sistemas de control en lazo abierto:** Si se parte de las definiciones anteriores un sistema en lazo abierto no tiene realimentación ya que la salida no es comparada con la entrada, es decir, dicha salida no tiene efecto sobre la señal que controla el sistema. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007)

Un sistema de control en lazo abierto utiliza un regulador o actuador de control sea electrónico, electro o mecánico para obtener una respuesta deseada en una planta o proceso el cual mediante un controlador optimiza o regula alguna determinada característica del proceso tal como se observa en la Figura 2.38.



Figura 2.38. Sistema de control en lazo abierto. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007)

- **Sistema de control en lazo cerrado:** Al contrario de los sistemas de control en lazo abierto, los sistemas de control en lazo cerrado si tienen retroalimentación. La salida o señal controlada, debe ser realimentada y comparada con la entrada de referencia, la cual envía una señal actuante o acción de control, proporcional a la diferencia entre la entrada y la salida a través del sistema, para disminuir el error y corregir la salida. La señal de salida tiene efecto directo sobre la acción de control por lo cual hace obligatorio que para denominarse sistema de control en lazo cerrado este deba tener retroalimentación tal como se observa en la figura XX. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007)

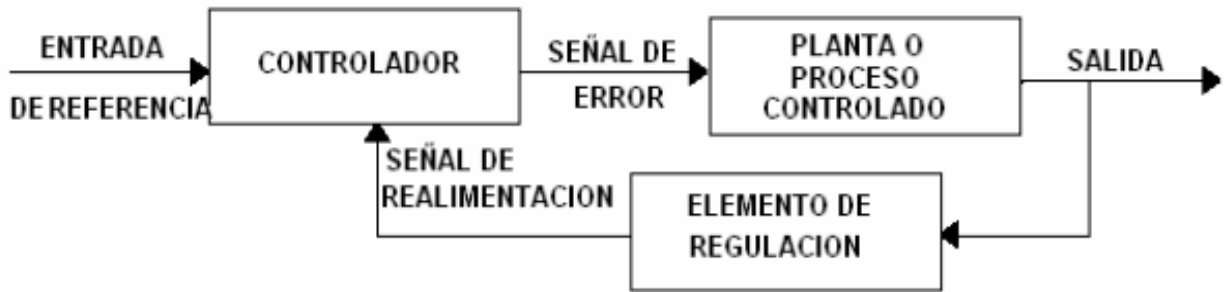


Figura 2.39. Sistema de control en lazo cerrado. (Perez Hidalgo , Perez Berenguer, & Perez, 2007)

2.6. Software para ingeniería

2.6.1. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es un software de modelado paramétrico de sólidos en 3D, Inventor ofrece herramientas profesionales y específicas para el diseño mecánico 3D, documentación y simulación de productos, lo que facilita el trabajo de diseño de productos ya que trabaja de manera eficiente con una combinación potente de capacidades de diseño paramétrico, directo, de formas libres y basado en reglas.

Como es un programa específico para diseño de producto tiene una gran cantidad de funciones como diseño paramétrico de piezas y ensamblajes, simulación, visualización, automatización, bibliotecas de elementos normalizados y bocetaje, que en otros programas CAD son secundarias.

Inventor permite la integración de datos en 2D y 3D en un mismo entorno creando una representación virtual del producto final, de forma que se puede inspeccionar y ajustar el funcionamiento del producto en cualquier momento durante la fase de diseño. (Autodesk Inc, 199)

2.6.2. EasyEDA

EasyEDA es un software para la automatización del diseño electrónico que puede funcionar en navegador web y como aplicación de escritorio, su conjunto de herramienta permite a los usuarios crear sus diseños electrónicos, modelarlos y simular su funcionamiento.

Este software es muy versátil para el trabajo colaborativo ya que permite el trabajo en simultaneo gracias a su conexión con la nube, en la cual un solo usuario crea el archivo principal y este solo debe compartirlo con su equipo de trabajo. Easy EDA cuenta con muchísimas opciones, entre ellas la creación de listas de materiales, archivos Gerber, así

como archivos de selección, colocación y salidas documentales en formatos PDF, PNG Y SVG. (Deingenierias, 2022)

2.6.3. Fritzing

Herramienta de diseño electrónico que posee extensas librerías de elementos y dispositivos eléctricos y electrónicos que facilitan el diseño, montaje y construcción de prototipos. (Fritzing GmbH)

CAPITULO 3

3. Desarrollo de un banco de control de ángulo de ataque (BCAA).

3.1. Antecedentes

3.1.1. Diseño de un túnel de viento

El diseño del banco de prueba para el ángulo de ataque (BCAA) para perfiles aerodinámicos parte del diseño de un túnel de viento, el cual soporta el montaje del circuito de control, por lo tanto, se procede a realizar el diseño de dicho túnel de viento bajo los parámetros, normativas y definiciones implementadas a lo largo del escrito presente.

Se desarrolla el diseño general de los elementos que componen el túnel de viento en el software para ingeniería Inventor, que para tomar de base la construcción del túnel es necesario el diseño de cada una de las partes para después poder ensamblar los componentes, se puede observar el diseño del túnel de viento en la Figura 3.1.

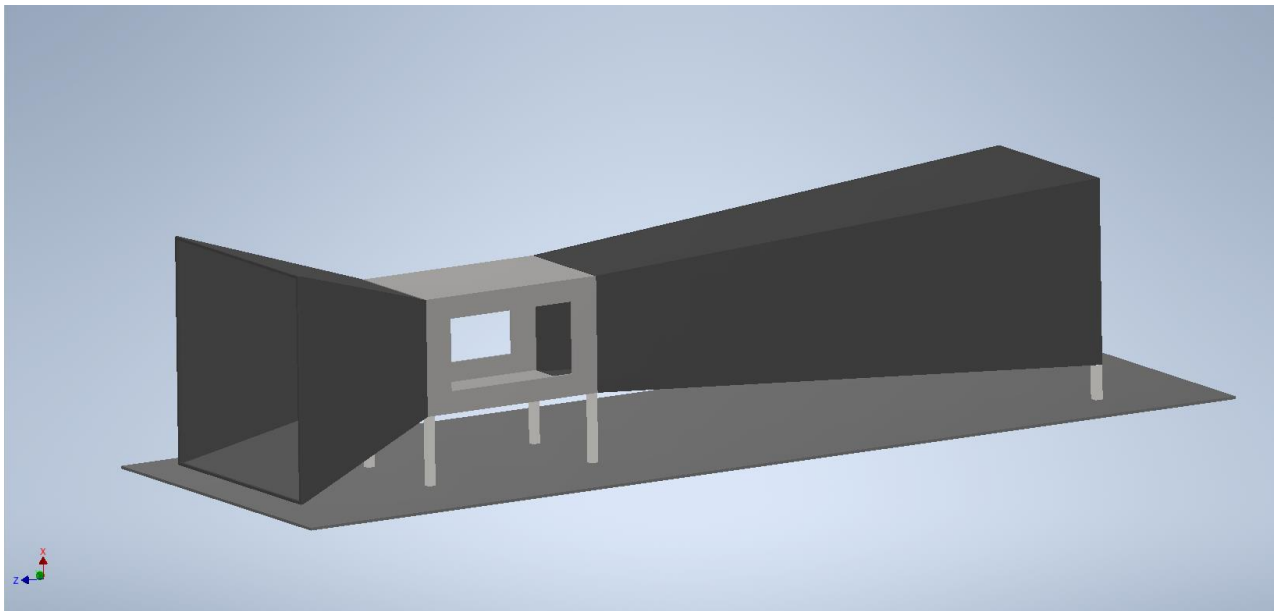


Figura 3.1. Túnel De viento en Software CAD. (Autores)

3.1.2. Construcción del túnel de viento

El banco de prueba para el ángulo de ataque de perfiles aerodinámicos debe ubicarse sobre una plataforma o herramienta que cumpla con los requerimientos necesarios para desarrollar las pruebas del sistema.

Dicha herramienta es un túnel de viento, del cual ya se habló anteriormente y el cual se construyó tanto como para este proyecto y otros proyectos de ingeniería del semillero de aeronáutica de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), el túnel de viento se observa en la Figura 3.2.



Figura 3.2. Túnel de viento semillero de aeronáutica UTP. (Autores)

3.2. Diseño CAD del banco de ángulo de ataque

Para iniciar con el diseño del banco de pruebas del ángulo de ataque en el túnel de viento construido, se debe tener un parámetro para los perfiles alares a los cuales se realizaran pruebas, las características de las dimensiones del banco dependen del tamaño de la cámara de pruebas del túnel de viento, se empieza diseñando un perfil alar, y para empezar a diseñar el perfil se puede acceder a la página de internet Airfoil Tools, el cual es una herramienta bastante utilizada para facilitar las búsquedas y comparaciones, así mismo se construye los perfiles aerodinámicos con puntos de coordenadas que se unen dando forma a los distintos perfiles, en la Figura 3.3 se observa la presentación de la página. (Airfoil Tools, 2022)

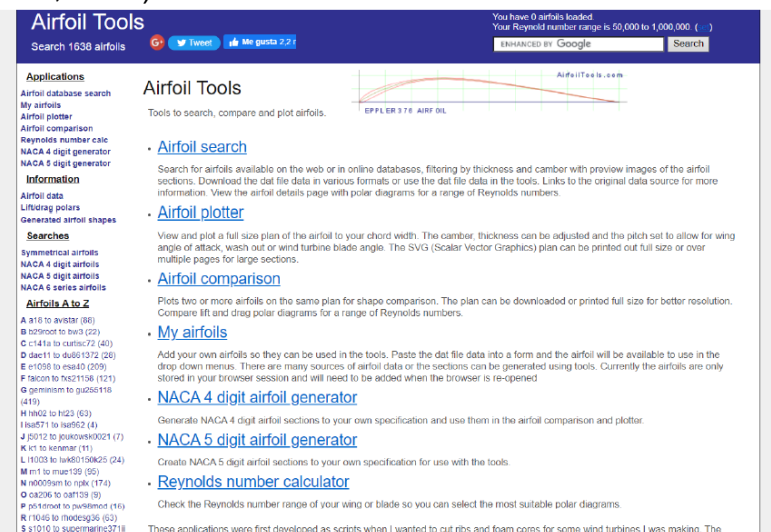


Figura 3.3. Página Airfoil Tools. (Airfoil Tools, 2022)

El diseño del perfil aerodinámico depende de las dimensiones de la cámara de ensayos del túnel de viento, teniendo las medidas de cada uno de los lados de la cámara, se puede determinar un rango de medidas para los perfiles aerodinámicos, en este caso se prueba el perfil Clark-y, que es un perfil sencillo de diseñar e imprimir en el caso de llevar a cabo, en la página Airfoil Tools, se busca y se toma las dimensiones y los datos que son necesarios para obtener el boceto en el software de diseño CAD, En la Figura 3.4 se observa los enlaces que dispone la página, en el enlace CSV file of coordinates se procede a descargar las características del perfil para poder extrapolarlo al software de diseño. (Airfoil Tools, 2022)

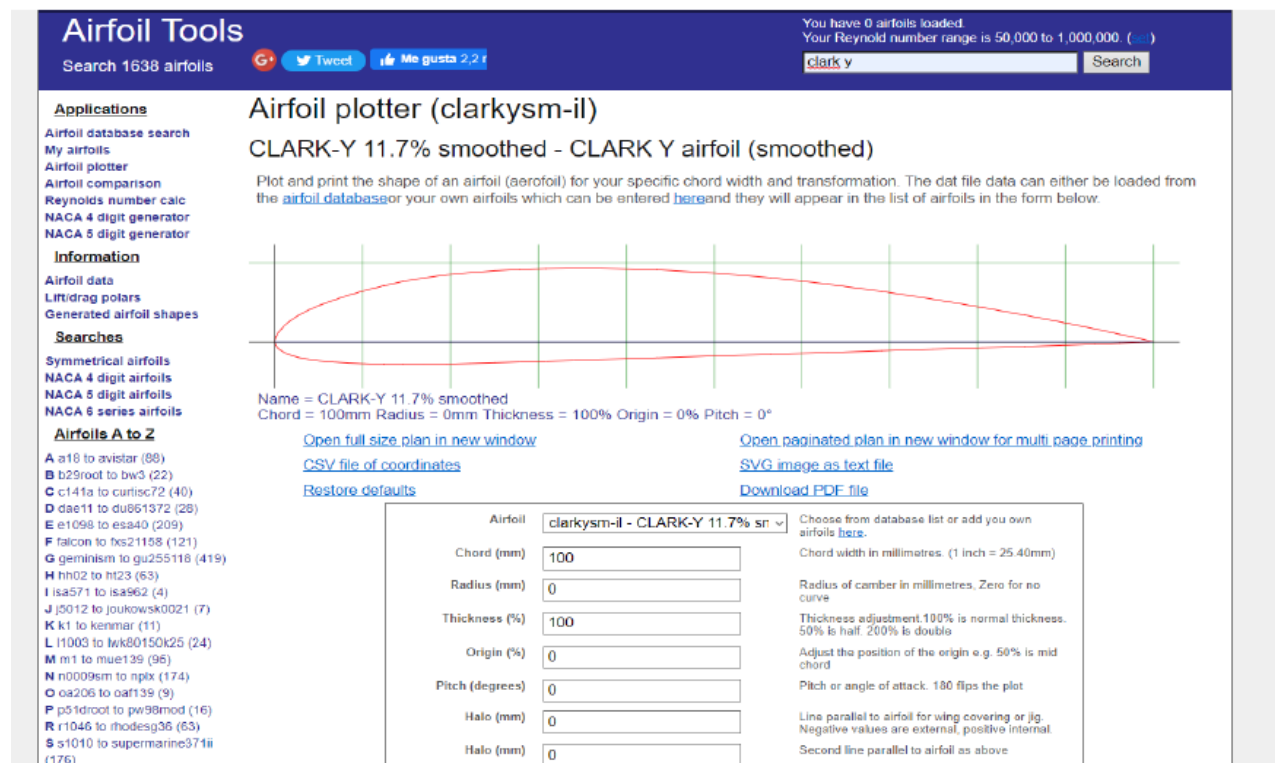


Figura 3.4. Perfil aerodinámico Clark-y. (Airfoil Tools, 2022)

Descargado el archivo .exe que nos dispone la página, se puede empezar a diseñar el perfil aerodinámico Clark-y, ajustando el archivo que se extrapola al software, quedaran los puntos que se deben unir mediante unas herramientas del software Inventor, en la Figura 3.5 se observa como quedan y las dimensiones predeterminadas del perfil, teniendo en cuenta que el perfil debe ser a escalada se tiene que estipular un rango de dimensiones a los cuales el banco del ángulo de ataque debe estar sometido, en este caso el máximo tamaño de la envergadura es de 18 a 20 cm, y con respecto a la cuerda puede ser dependiente de la envergadura para darle forma al perfil, en este caso el perfil aerodinámico de forma predeterminada tiene una cuerda de 100 cm, y el centro de masa se ubica al 30% del total de la cuerda.

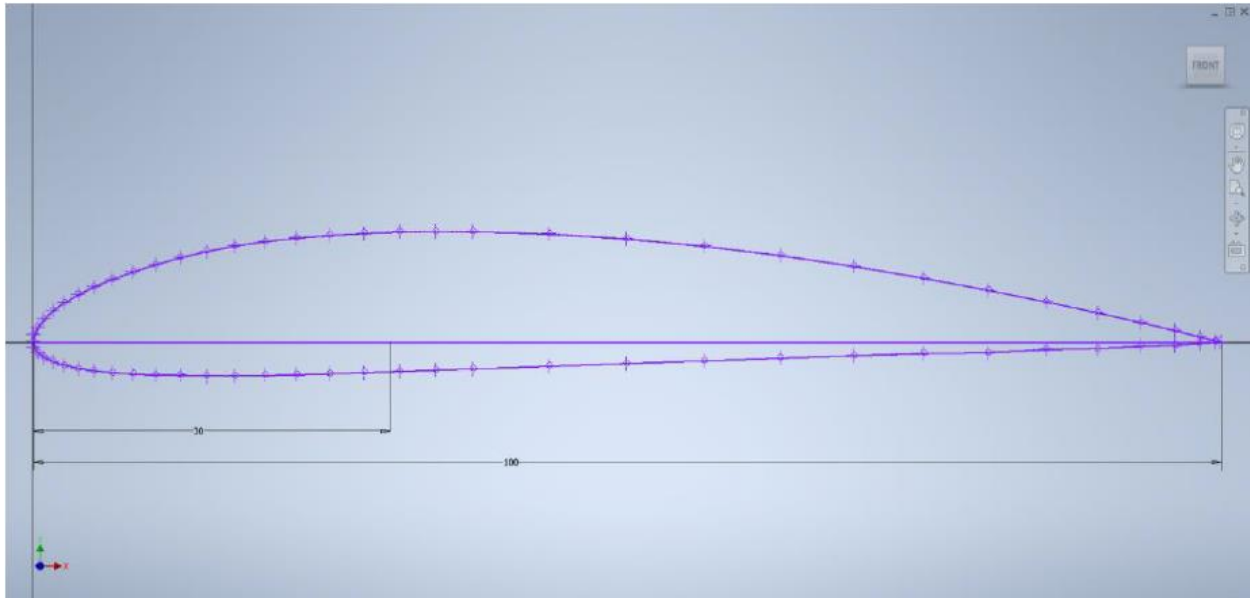


Figura 3.5. Diseño del perfil Clark-Y. (Autores)

Haciendo uso de la herramienta Spline de interpolación del software Inventor, se crea una curva spline a través de los puntos seleccionados para asimismo dar forma al boceto del perfil.

Con la herramienta de Extrusión se crea un cuerpo añadiendo profundidad al perfil, el cual genera un sólido para formar la pieza deseada. La envergadura del perfil aerodinámico al momento de extruirlo va a tener una longitud de 60 cm, por esta razón al momento de escalar el perfil se va a reducir de tal forma que entre en el rango del banco de pruebas para el Angulo de ataque, en la Figura 3.6 se observa en el software inventor la extrusión del boceto 2D del perfil aerodinámico.

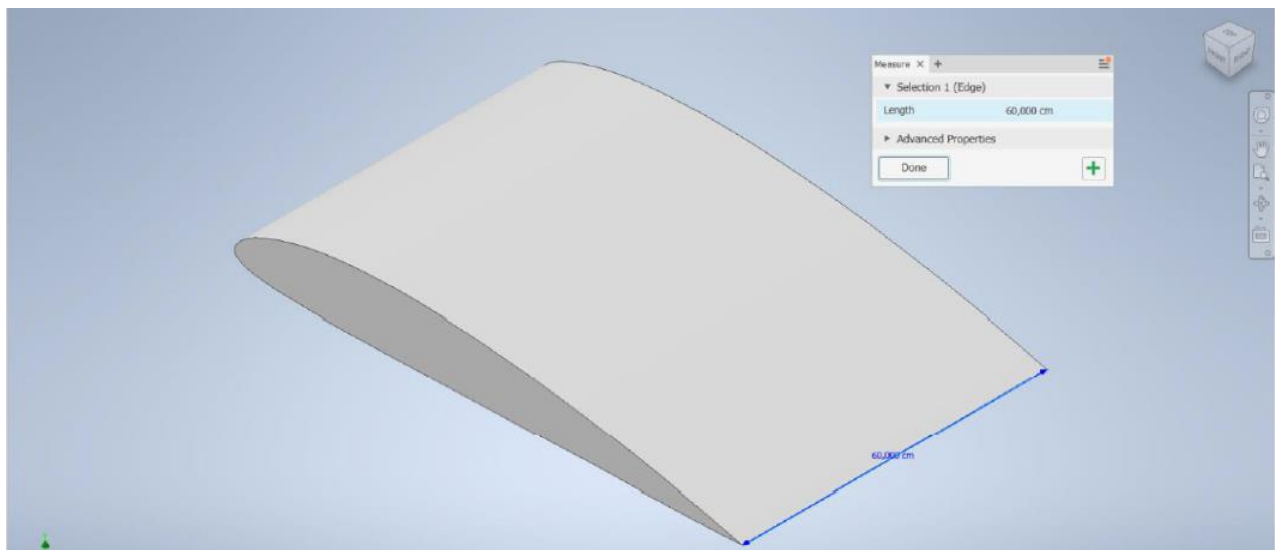


Figura 3.6. Extrusión del boceto Clark-Y. (Autores)

El eje que va a transmitir el movimiento rotacional desde el servomotor al perfil debe ir atravesado en el centro de masa del perfil, pero antes de obtener el centro de masa, se debe conocer las dimensiones del eje que se utilizara. A partir de estos parámetros se diseñó un tornillo que tiene de longitud 27 cm, con un diámetro de 0,78 cm.

Teniendo las dimensiones del eje, se procede a diseñar el eje de transmisión para poder ensamblar lo con el perfil aerodinámico, teniendo en cuenta que en el diseño aún no se manejan las tolerancias para ensamblar todo el banco una vez finalizado el diseño, se realizó de forma ideal las dimensiones de cada una de las partes del diseño. en la Figura 3.7 se observa el tornillo que se encarga del movimiento del perfil aerodinámico.

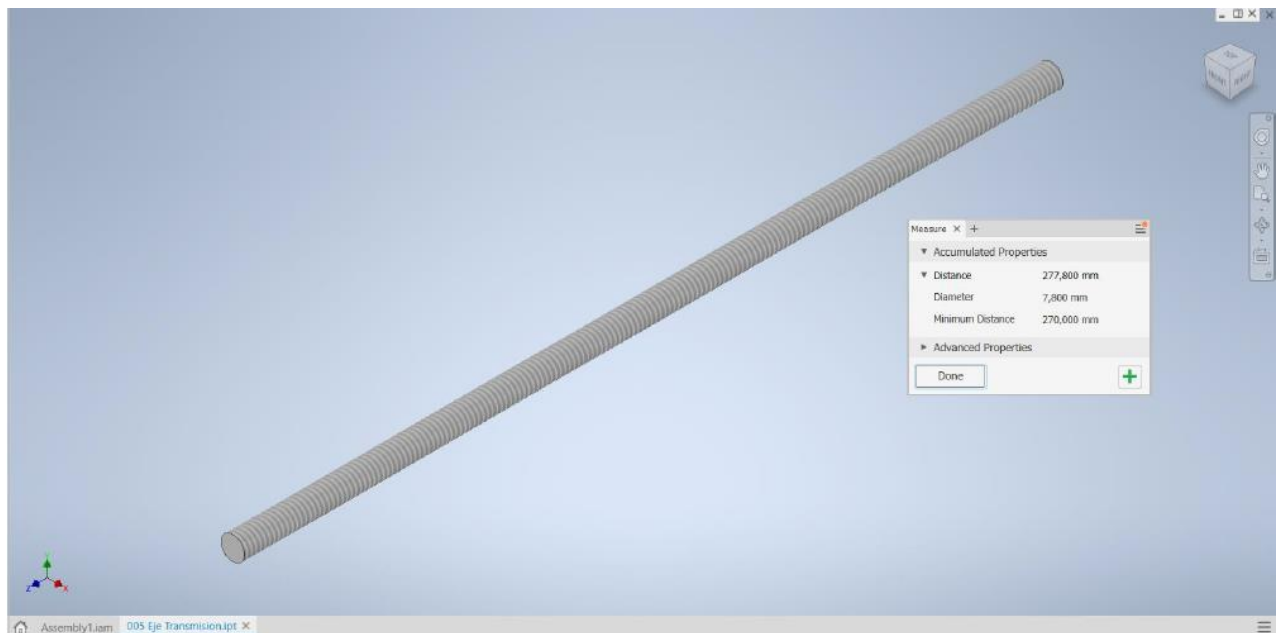


Figura 3.7. Diseño del Eje transmisión de movimiento. (Autores)

Con el eje de transmisión diseñado se conoce el diámetro del agujero que debe tener el centro de masa en el perfil aerodinámico Clark-y para poder insertarlo, además en la Figura 3.8 se observa que para tener una escala del perfil, se debe crear otro archivo .apto, donde en la herramienta Derive en Manage del software Inventor, se puede escoger el factor de escala para reducir o aumentar la pieza al tamaño que sea necesario, en este caso se utiliza un factor de 0.3, para que la envergadura mida 18 cm y a su vez la cuerda aproximadamente mida 30 cm, en la pieza ya construida, se dibuja un círculo con el diámetro del tornillo en un boceto de la cara del perfil, para después extruirlo y hacer el agujero por el cual se ensamblara el eje de transmisión.

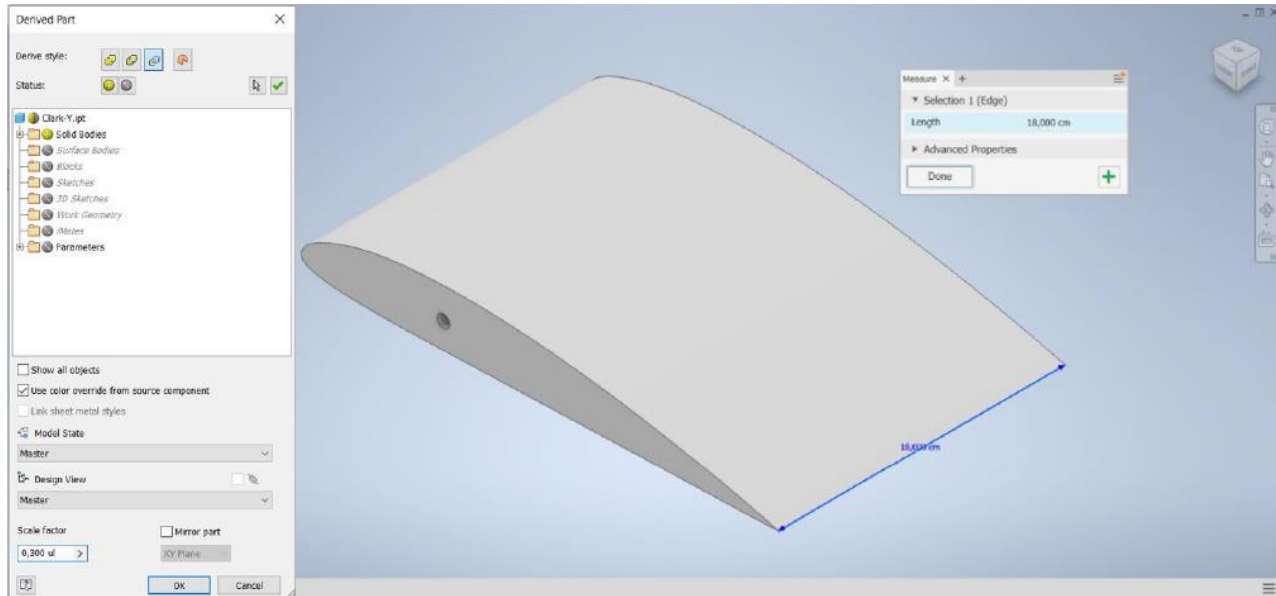


Figura 3.8. Perfil a escala con el centro de masa. (Autores)

En la Figura 3.9 se observa la pieza donde se empieza a ensamblar cada una de las piezas para dar forma y dimensiones al banco de pruebas para el ángulo de ataque, se tiene como primer ensamble la unión del eje de transmisión y el perfil aerodinámico, como primera observación que se puede presentar en el perfil es que se puede ver grande para el eje, pero se debe tener en cuenta que el perfil se va a diseñar de un material liviano y en este caso el perfil está con el rango máximo que se permitirá en el banco de pruebas.

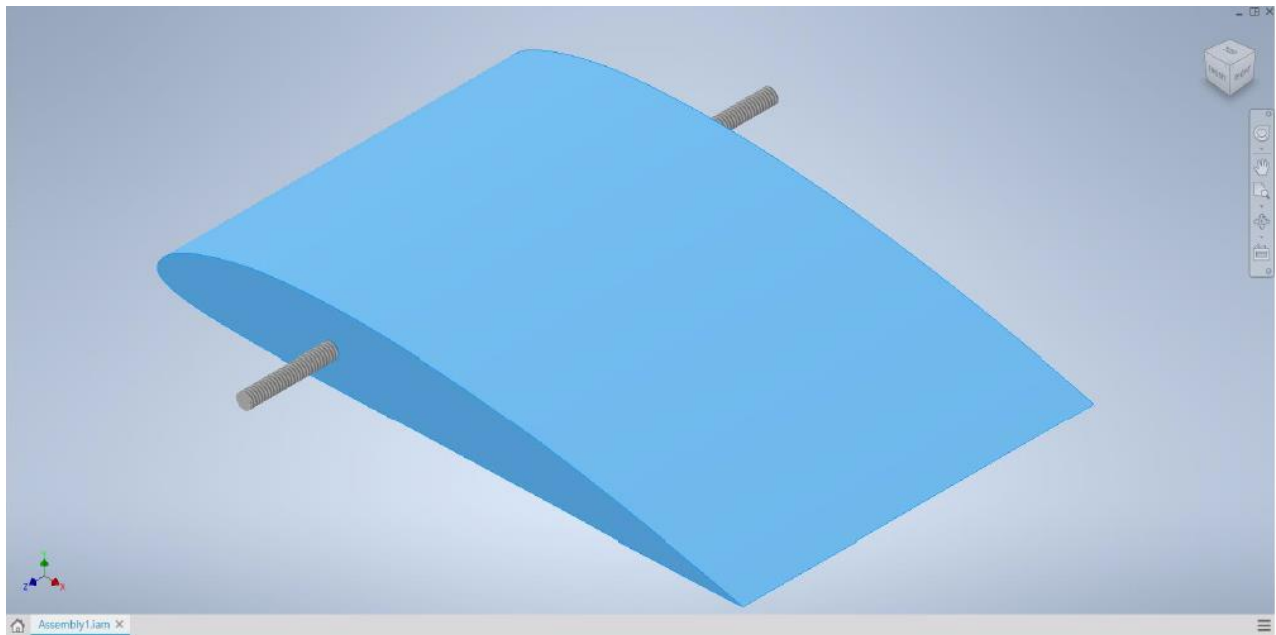


Figura 3.9. Ensamble eje con Perfil Clark-Y (Autores)

El perfil Clark-y se rediseña para poder hacer la impresión 3D de la pieza, por esa razón se piensa una estructura simple y eficiente que a la vez que sea ligera en el momento de consumir el material de impresión, se genera un vaciado a la pieza de 1,5 mm, para generar una capa rígida de la superficie del perfil, además, en la parte interna se crean paredes para reforzar la pieza y que sea más rígida, también se crea una ranura para el eje principal, con el fin de ensamblar más sencillo las piezas, de esa misma forma las paredes internas son de 1,5 mm, en la Figura 3.10 se observa el perfil con las paredes internas y el color que se implementa para que resalte en comparación con las demás piezas del banco de pruebas.

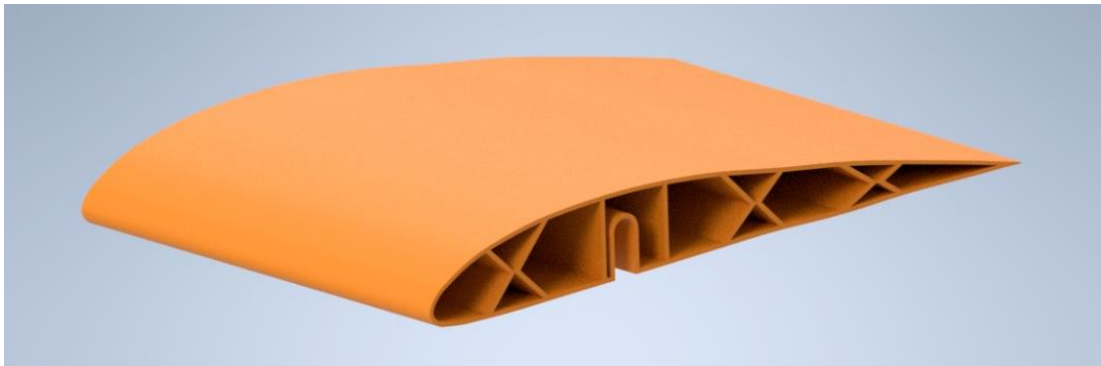


Figura 3.10. Paredes internas del perfil Clark-y. (Autores)

El diseño del perfil aerodinámico Clark-y debe soportar los instrumentos de medición del Angulo de ataque, por ende, se diseña una superficie donde se tiene en cuenta el giroscopio MPU-9250 que se encargara de retroalimentar el ángulo al cual se disponga, asimismo el inclinómetro con el que se dispone para el banco de pruebas, considerando las dimensiones, estos dos instrumentos se ponen sobre la cuerda del perfil ya que es por medio de ella que se mide el ángulo de ataque, en la Figura 3.11 se observa el soporte con el diseño del perfil Clark-y.

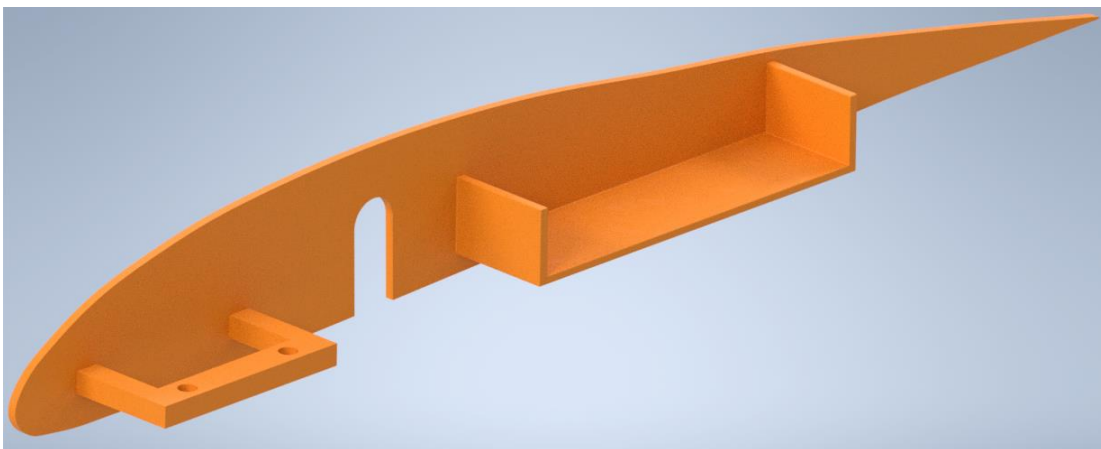


Figura 3.11. Soporte del acelerómetro e inclinómetro. (Autores)

En la Figura 3.12 se muestra el perfil aerodinámico Clark-y ensamblado con el soporte del inclinómetro y el acelerómetro, además de mostrar el soporte del eje de transmisión.

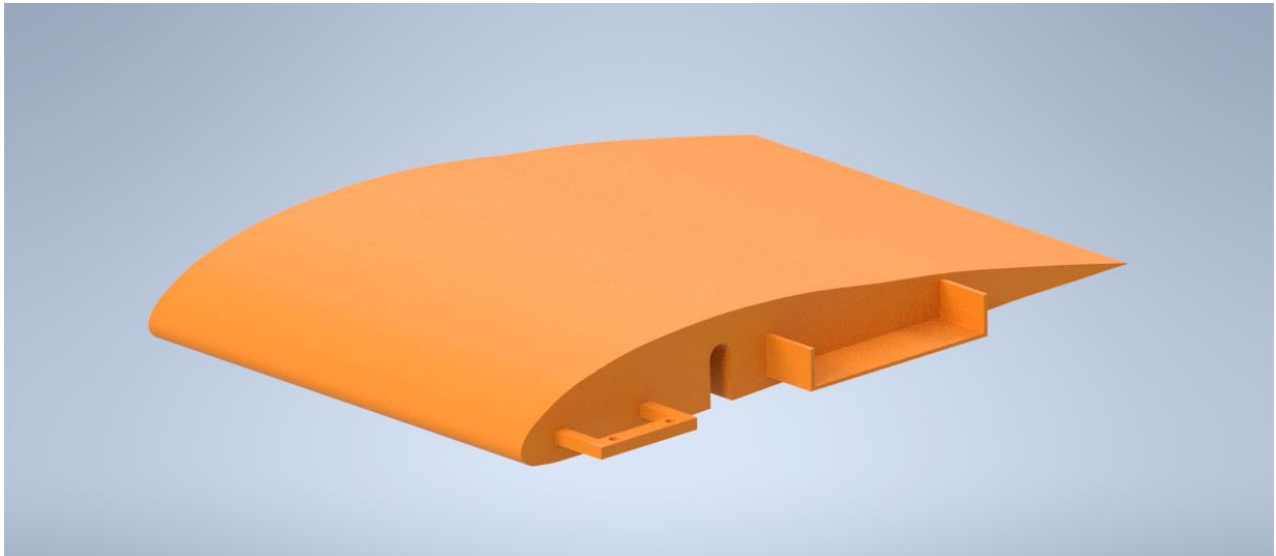


Figura 3.12. Rediseño del perfil aerodinámico Clark-y. (Autores)

El motor que se encargara en darle el movimiento al sistema va a ser un motor paso a paso Nema 17HS4401, que es ideal para para proyectos de impresoras 3D y maquinaria CNC, debido a su precisión de giro y facilidad de control, cumple con el estándar Nema17 que define el tamaño del motor, por lo que puede usarse en cualquier proyecto CNC o 3D que este diseñado para usar motores que cumplan con dicho estándar. Se trata de un motor de tipo bipolar, que tiene un ángulo de paso de 1.8° (200 pasos por vuelta) y cada bobinado es de 1.5A, capaz de desarrollar un torque de hasta 4Kg/cm. Este motor puede ser utilizado con los controladores de motores tipo pololu A4988 y DRV8825, en este caso se utilizará el segundo tipo de controlador nombrado, del cual se hablará más adelante para el sistema del control de movimiento, un motor paso a paso NEMA tiene gran capacidad para controlar la posición de su eje, al mismo tiempo ofrece un excelente torque, por lo que se puede ocupar además de los proyectos mencionados. (Ardobot Robótica SAS, 2023)

Al momento de diseñar el motor, se encuentra una herramienta de búsqueda de piezas diseñadas en los distintos softwares de CAD, que nos facilita varias piezas que distintos diseñadores realizan y publican libremente para que cualquier aprendiz adquiera conocimientos y recursos de forma gratuita, el fin de estas herramientas es observar, comprender y analizar las piezas que se pueden utilizar en el diseño que se está realizando para tener en cuenta las medidas del resto de las piezas al momento de ensamblarlas, como es en este caso, donde al principio antes de cortar y tener el soporte del servomotor, se necesitan las dimensiones y distintas ideas que se pueden aplicar, en la Figura 3.13 se observa el inicio de la página y algunos ejemplos de diseños destacados de la página. (GrabCAD)

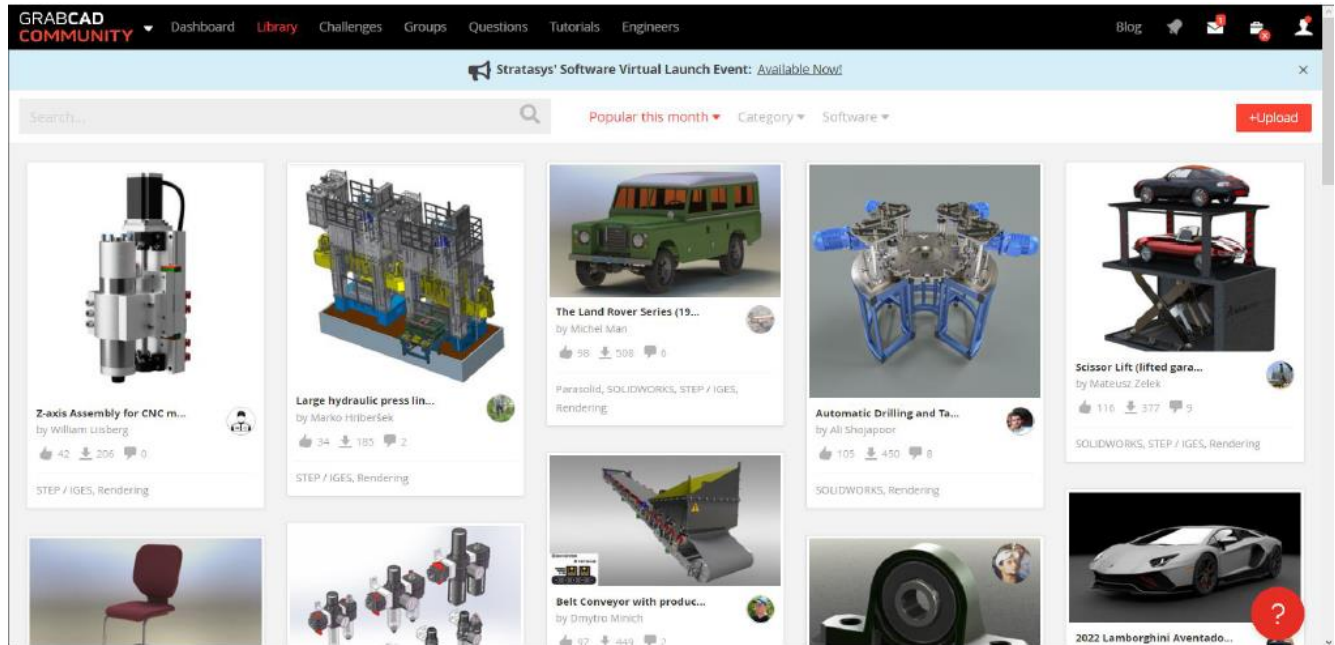


Figura 3.13. Página Grabcad.(GrabCAD)

En la Figura 3.14 se muestra el diseño del motor a pasos NEMA 17HS4401 en el software de Inventor, donde se observa todas las características físicas y dimensiones, en este caso se deben tener en cuenta dos ideas importantes con respecto a la posición del servo, la primera es la forma en que va a transmitir el movimiento rotacional al eje, y la altura con respecto a la salida del movimiento, además de tener en cuenta que va a sostener todo el sistema de movimiento.

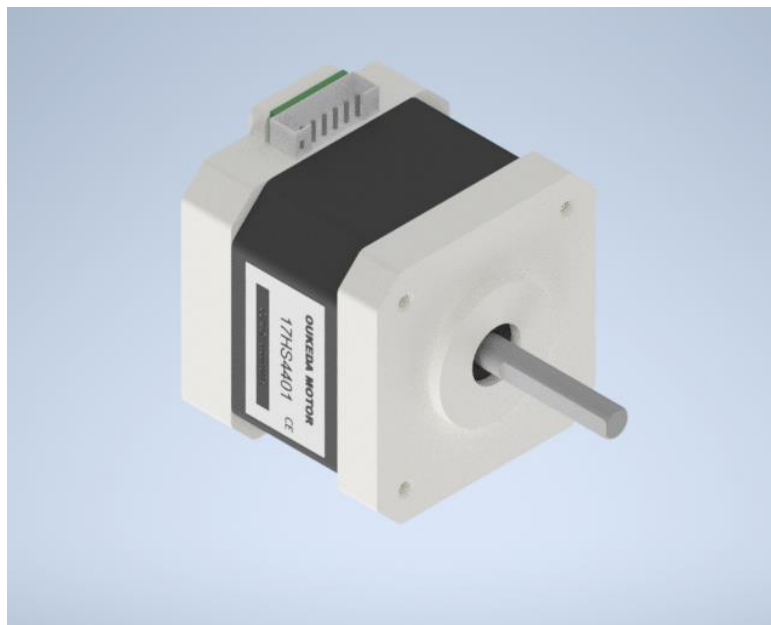


Figura 3.14. Diseño motor a pasos NEMA 17HS4401. (Autores)

La primera solución con respecto a la transmisión del movimiento que ejerce el motor a paso al eje que sostiene el perfil, es un acople comercial que sea sencillo de encontrar, además que las dimensiones del diámetro de la salida del motor a pasos, y el diámetro del eje de transmisión coincidan con las características del acople.

Correspondientemente el diseño del acople se hace de forma sencilla, teniendo un cilindro extruido con referencia al diámetro de un acople comercial, se obtiene un cilindro, de tal forma que, haciendo los agujeros para cada una de las caras planas del cilindro respecto a los diámetros del eje y la salida del servo, se obtiene en la Figura 3.15 el acople diseñado.

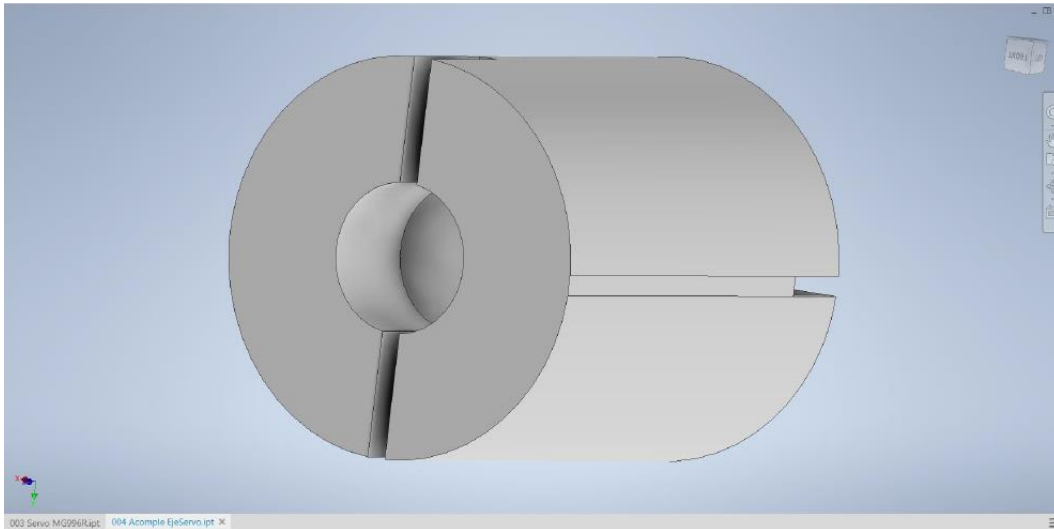


Figura 3.15. Diseño del acople Eje – Motor a pasos. (Autores)

Siguiendo con el ensamble, se observa en la Figura 3.16, la forma en que se debe ensamblar el acople con respecto al eje de movimiento para el perfil aerodinámico, teniendo en cuenta que los dos diámetros (Eje – Salida del servo), son diferentes, se debe tener un orden al momento de ensamblar.

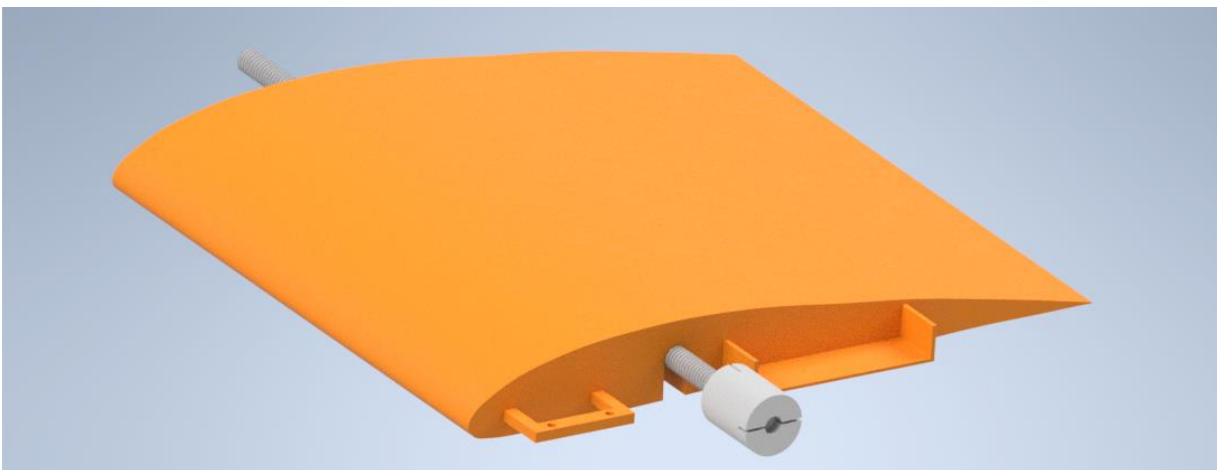


Figura 3.16. Ensamble Eje con acople. (Autores)

En el momento que se diseñó el acople del motor a pasos con el eje de transmisión de movimiento, se tiene un acople comercial, en donde las medidas de la salida del motor a pasos no concuerdan con el diámetro del cilindro, en ese sentido se diseña un buje para el acople y el motor a pasos, el cual es un elemento que servirá para dar apoyo y hacer que gire correctamente, en la Figura 3.17 se muestra el buje del motor a pasos.

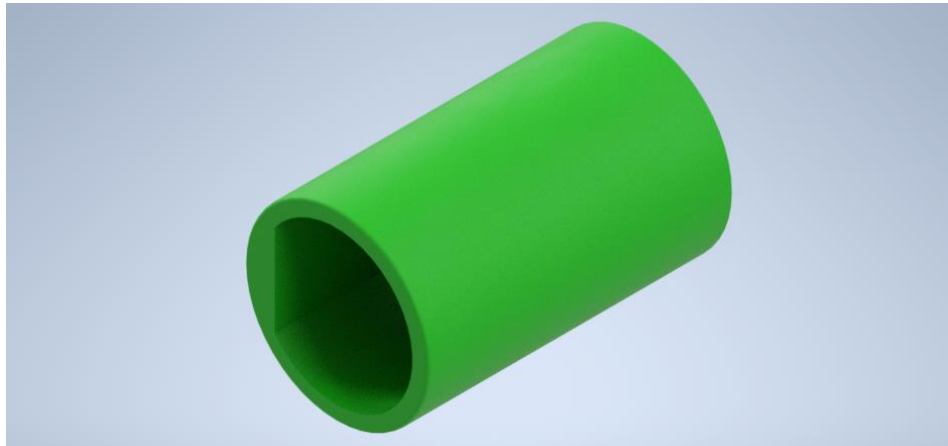


Figura 3.17. Buje acople eje motor a pasos. (Autores)

Teniendo todo el sistema de movimiento del banco de pruebas diseñado, se procede a ensamblar, para poder observar y analizar de qué manera se puede tener un soporte de tal forma que se caracterice con ser una pieza resistente, accesible, y que disponga del tamaño ideal con respecto a la altura deseada, además, que no interfiera demasiado con la visión al momento de realizar pruebas con el ángulo de ataque en el perfil, en la Figura 3.18 se observa el diseño del sistema de movimiento.

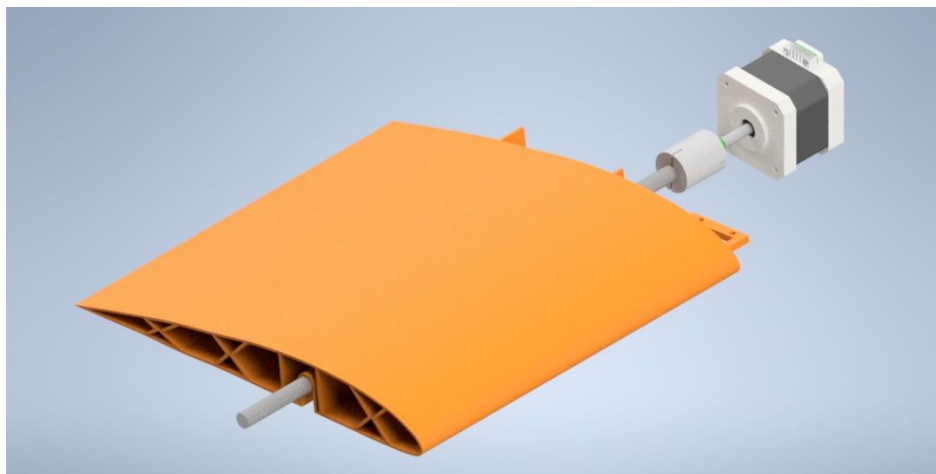


Figura 3.18. Perfil en Software CAD. (Autores)

El módulo basado en el sensor IMU MPU9250 y contiene todo lo necesario para realizar rastreo de movimiento de 9 ejes (o DoF). Combina un giroscopio de 3 ejes, un acelerómetro de 3 ejes y un magnetómetro de 3 ejes en un mismo chip. Integra un DMP

(Procesador digital de movimiento) capaz de realizar complejos algoritmos de captura de movimiento de 9 ejes, en la Figura 3.19 se muestra el diseño del giroscopio adquirido por la página de diseño Grabcad, donde se puede desarrollar el soporte en el perfil aerodinámico según las dimensiones del instrumento.

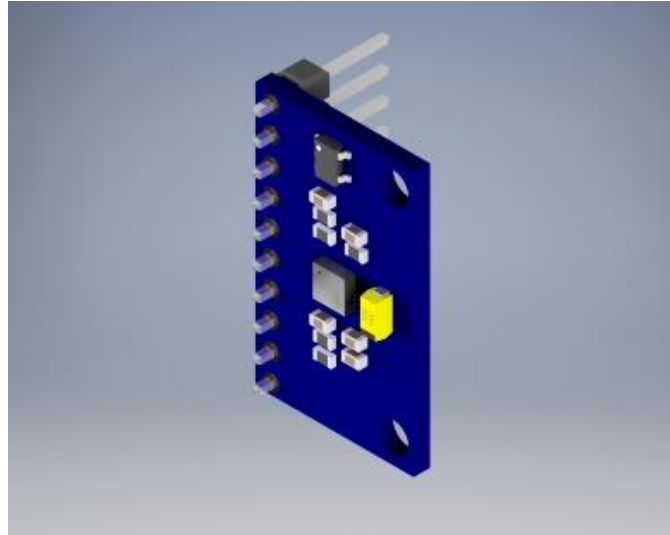


Figura 3.19. MPU - 9250 (Autores)

Así mismo como instrumento de medición se obtiene un inclinómetro digital de nivel, el cual es una herramienta que se aprovecha para medir ángulos de este modo, para la variable que se estará evaluando en el trascurso de los resultados tiene como funcionalidad comprobar el ángulo de ataque que se presentará en el perfil aerodinámico. El inclinómetro tiene un rango de medición de $\pm 180^\circ$ (0° - 360°), y con unos imanes integrados en la parte inferior se puede diseñar una superficie en el perfil se esas dimensiones para que sea sencillo al momento de colocar el dispositivo en el perfil, en la Figura 3.20 se muestra el inclinómetro en el software de Inventor.

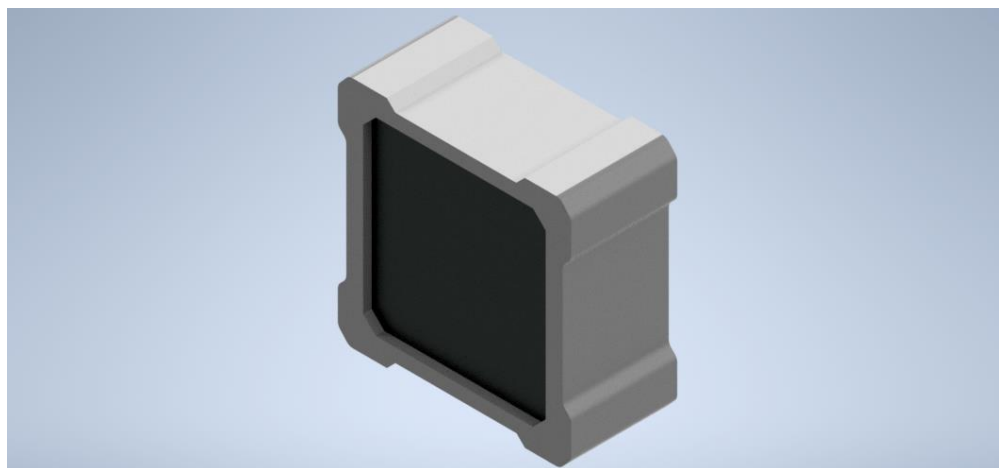


Figura 3.20. Inclinómetro. (Autores)

En la Figura 3.21 se observa los instrumentos de medición que tendrá el sistema en unos de los perfiles de prueba que se diseñó, en el cual se trazó el soporte de cada uno de ellos por la cuerda media del perfil, ya que teóricamente es desde ese punto que se toma el ángulo de ataque del perfil.

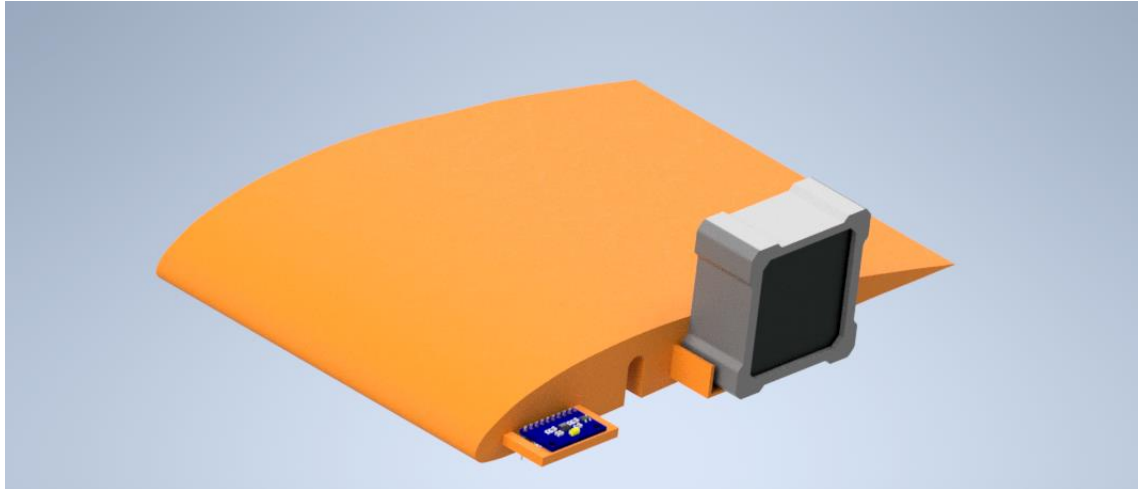


Figura 3.21. Perfil aerodinámico con instrumentos de medición. (Autores)

Para el soporte del motor a pasos, se selecciona una lámina de aluminio, teniendo en cuenta que es un material resistente, además, de que deben ser dos partes en el cual se va a sostener el sistema de movimiento, por ende, para el diseño de los soportes van a tener un grosor de una lámina comercial.

Teniendo en cuenta el grosor del motor a pasos y la altura ideal a la que se desea llegar, se tiene una distancia de 20 cm desde el eje del perfil, hasta el suelo, de ese modo se conoce que el servomotor debe estar a esa altura, se deben tener los 20 cm, considerando la altura a la que debe estar el servo, se diseña la pieza de forma sencilla para que el servomotor encaje y sea ajustado con unos tornillos, en la Figura 3.22 se observa el diseño de la lámina que soporta el servomotor.

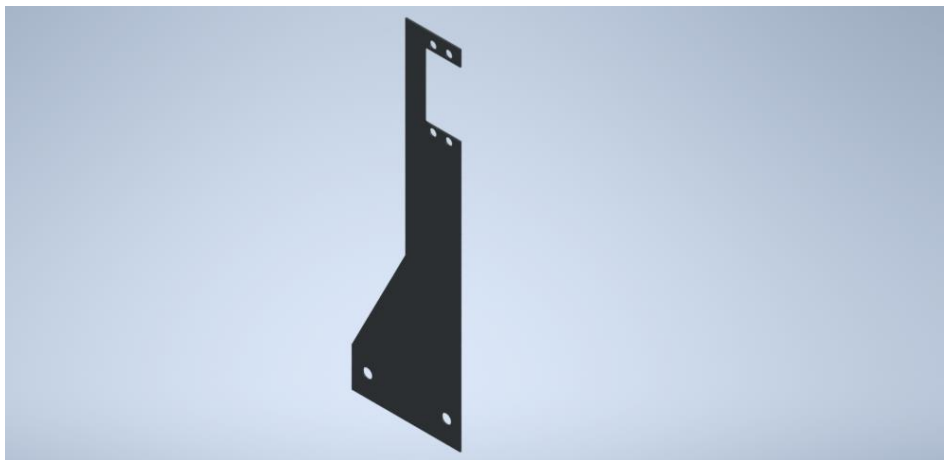


Figura 3.22. Diseño de placa soporte motor a pasos. (Autores)

Al momento de obtener la placa de soporte para el motor a pasos se tiene en cuenta el diseño de la lámina, ya que se reciclo de una versión del proyecto anterior, en este caso se diseña un soporte para que encaje como intermedio entre la placa y el motor a pasos, de esa forma las dimensiones que se tienen en la placa deben coincidir con las dimensiones del motor, además de tener en cuenta lo voluminoso del mismo, en la Figura 3.23 se muestra el diseño soporte para el motor a pasos con los orificios para los tornillos que asegura la pieza.

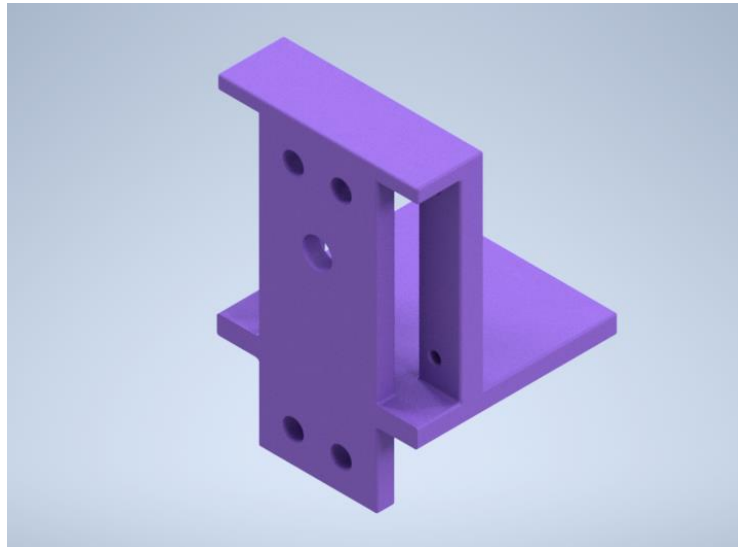


Figura 3.23. Soporte NEMA 17HS4401. (Autores)

En la Figura 3.24 se muestra el ensamble entre el soporte y el motor a pasos, una característica del soporte es el apoyo extendido que tiene para la base del motor, en el cual se crea una columna vertical para el apoyo de los tornillos que encajan con las dimensiones del motor a pasos.



Figura 3.24. Ensamble motor a pasos con soporte. (Autores)

Respectivamente se ensambla las piezas diseñadas que se encargaran de soportar el sistema que le dara movimiento al banco de pruebas, se esa forma se tiene dimensionado la altura y forma de unir los elementos. En la Figura 3.25 se muestra el ensamble con los tornillos y tuercas que tiene la placa.



Figura 3.25. Ensamble de la placa con soporte del motor a pasos. (Autores)

Asimismo, desde otra perspectiva se ensambla el acople del motor con el eje de transmisión, junto a los tornillos comerciales que se deben conseguir para unir el motor y la placa que sostiene a todo el sistema, en la Figura 3.26 se muestra el ensamble hasta el momento.



Figura 3.26. Ensamble soporte del motor a pasos con el acople. (Autores)

Al tener el soporte del motor a pasos, y el sistema de movimiento para el ángulo de ataque, se piensa en el otro lado del eje de movimiento, ya que en la parte derecha está el motor paso a paso, y en el otro lado debe estar apoyado en una pieza que permita que el eje gire libremente, en este caso se cuenta con un rodamiento con el diámetro inferior bastante cercano al eje.

Se puede obtener las dimensiones de los diámetros y el grosor del rodamiento mediante el Datasheet de un rodamiento con dimensiones similares, para poder realizar el diseño y seguir ensamblando las piezas, en la Figura 3.27 se observa el diseño del rodamiento.

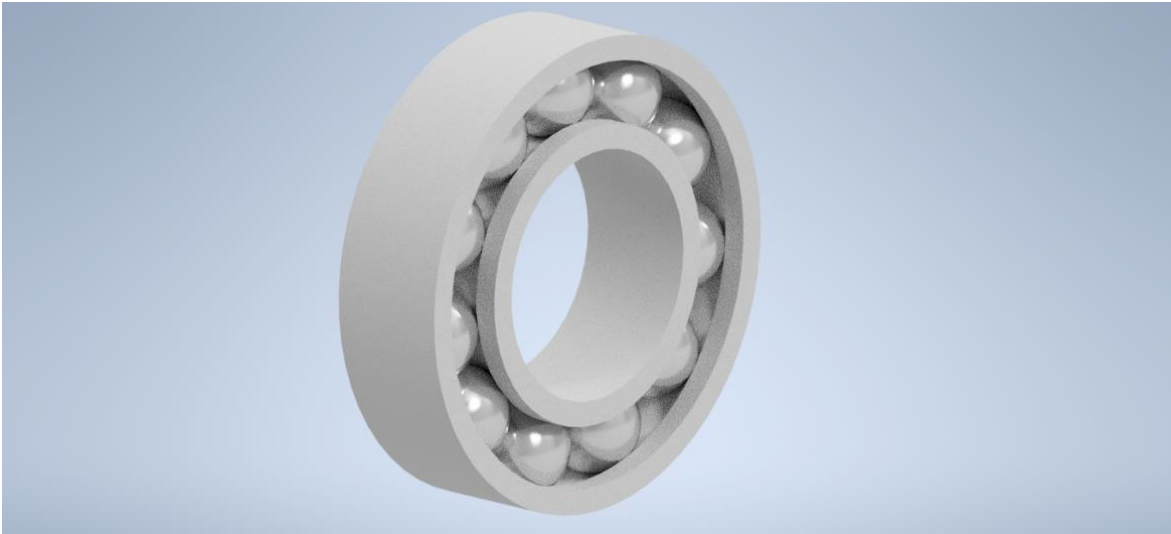


Figura 3.27. Rodamiento. (Autores)

En el software de Inventor se diseña un buje para que ocupe el espacio que hay entre el eje de transmisión y el rodamiento, es diseñado con el grosor del rodamiento, el diámetro interior es relacionada directamente con el diámetro del eje, en la Figura 3.28 se observa el diseño del buje.

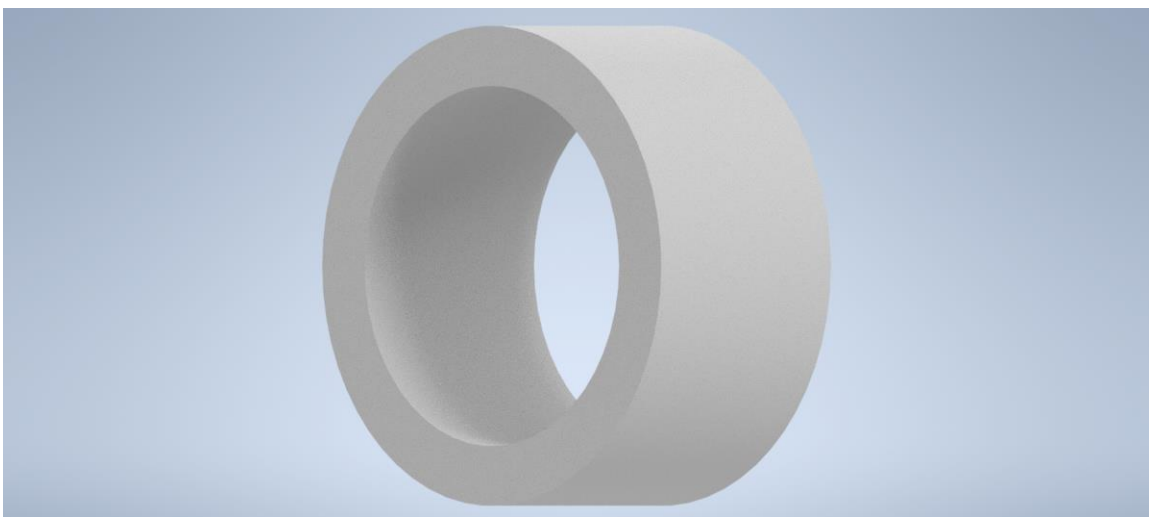


Figura 3.28. Diseño buje del rodamiento. (Autores)

La parte del soporte del servomotor va a ser la encargada del movimiento del eje que va a sostener el perfil aerodinámico, por ende, el rodamiento simplemente va a ser la extensión del movimiento. En este diseño de la pieza, se creó con el fin de que encajara el rodamiento, además de ir ensamblado con el soporte del banco, la idea de la pieza es que pueda extender hasta el límite máximo y mínimo del banco para la envergadura del perfil, del mismo modo sostener al rodamiento de forma adecuada y que entre a presión, la construcción de esta pieza es por medio de una impresora 3D, en la Figura 3.29 se observa el soporte del rodamiento.



Figura 3.29. Diseño soporte de rodamiento. (Autores)

Al mismo momento de diseñar el soporte del servomotor se diseña de la misma geometría el soporte del rodamiento, ya que finaliza dándole estabilidad a la estructura del banco, con ayuda del software de Autodesk Inventor, se construye las dimensiones para poder ensamblar las piezas de forma correcta sin que haya interferencias o desviaciones que afecten la prueba del banco, en la Figura 3.30 se observa el soporte del eje de transmisión.

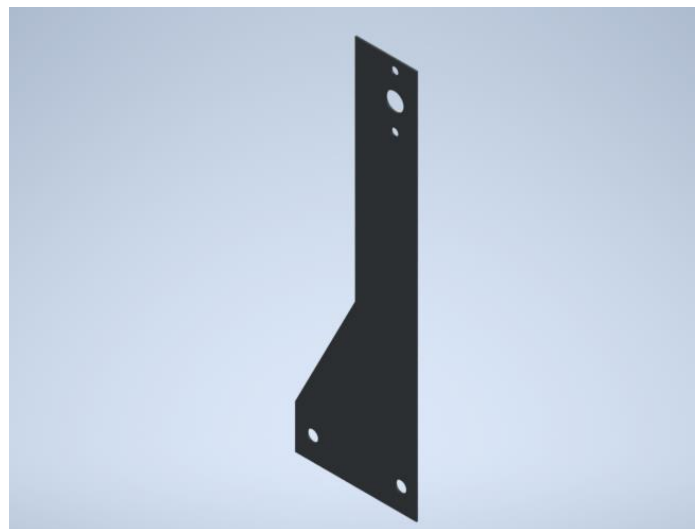


Figura 3.30. Diseño soporte del eje. (Autores)

Al ensamblar todas las piezas diseñadas hasta el momento, se observa la forma que va tomando la estructura y visualizando la idea con la que se quería llegar para las pruebas aerodinámicas que se pueden realizar a un perfil aerodinámico. Hasta el momento se trazó las piezas necesarias para el funcionamiento básico del banco de pruebas, pero aún faltan detalles en el diseño CAD para poder seguir con el proceso de construcción, y adquisición de las piezas en físico, en la Figura 3.31 se observa el ensamble final del proceso de diseño de las piezas necesarias para el funcionamiento del banco.

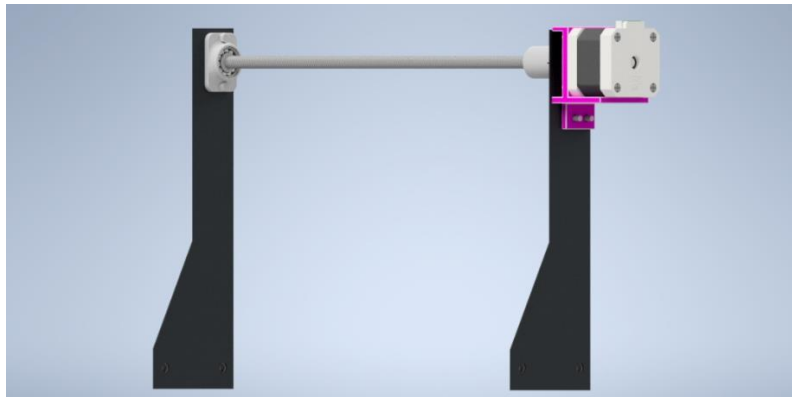


Figura 3.31. Primer diseño del prototipo del banco. (Autores)

Para el control del banco de pruebas se tiene planteado un interfaz apoyado de unos componentes electrónicos que permitirán navegar en el menú y poder configurar las opciones que se permitirán modificar, este conjunto de piezas se diseña y modela para construir un soporte en el cual se incorporarán los elementos con el fin de hacer funcionar correctamente el movimiento del ángulo de ataque del perfil aerodinámico con el que se realizarán las pruebas.

El primer elemento que se diseña es un teclado matricial 4x4 que servirá como herramienta para navegar entre el menú y configurar cada uno de los botones para una función especial, en la Figura 3.32 se muestra el teclado a escala real para así poder tener en cuenta las dimensiones con respecto a los otros componentes.

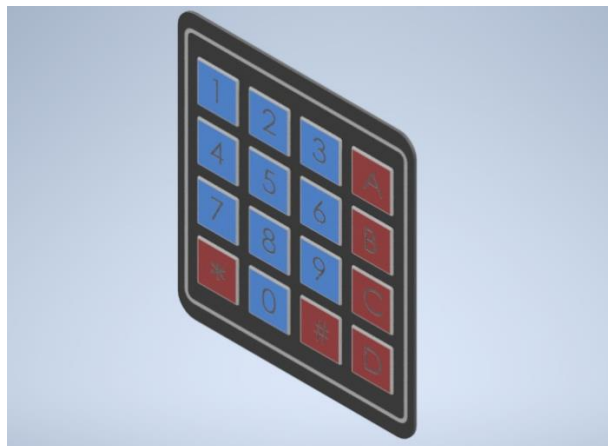


Figura 3.32. Teclado 4x4. (Autores)

Se obtiene el diseño del controlador DRV8825 del motor a pasos, para el modelo se obtiene las dimensiones de los puntos de apoyo para los tornillos y los conectores que se extenderán hasta el motor y el microcontrolador que se encargara de enviar la información necesaria para que el motor se mueva, asimismo la escala real del controlador que se incorporara en el soporte del sistema, en la Figura 3.33 se muestra el diseño del controlador en el software de diseño Inventor.

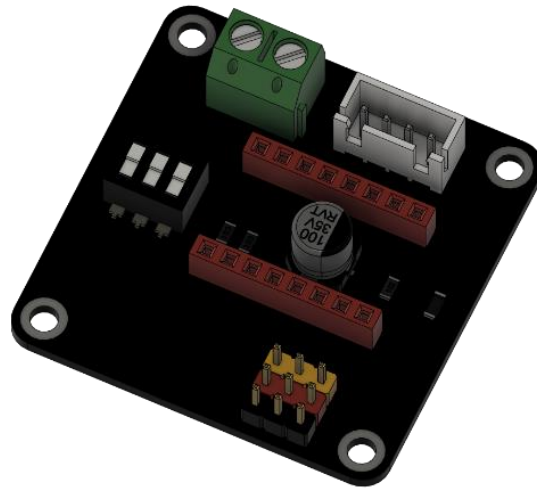


Figura 3.33. Driver motor a pasos DRV8825. (Autores)

La que se encargará de la interfaz de visualización será una pantalla lcd monocromática 2x16, ya que es una herramienta de fácil adquisición y por el protocolo de comunicación se hace sencillo el envío de información para la visualización del mensaje, además de ser un componente pequeño que encajara en el soporte. En la Figura 3.34 se muestra el diseño de la pantalla lcd 2x16.



Figura 3.34. Diseño de LCD 2x16. (Autores)

Como ultimo componente electronico se obtiene el diseño del microcontrolador ESP32 que se encargara de dar funcionalidad a todo el sistema de movimiento, en este caso en la Figura 3.35 se muestra el renderizado de la pieza, el diseño de este elemento es necesario para poder ubicarlo de forma optima, ya que en él se conectara el resto de componentes del banco de pruebas.

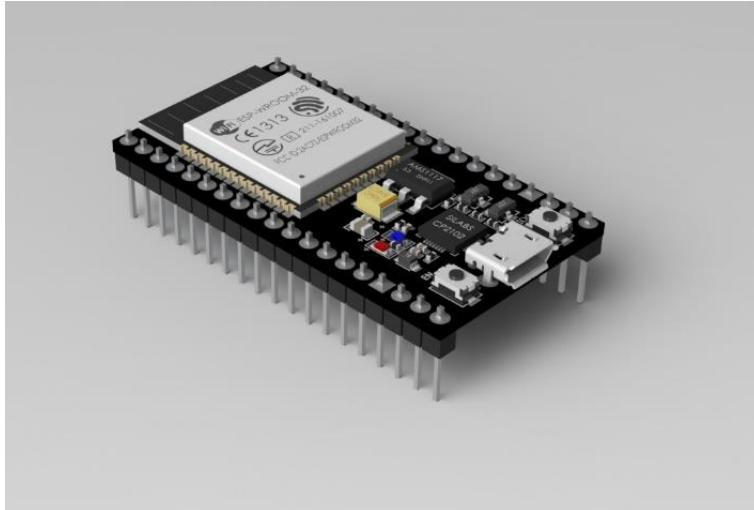


Figura 3.35. Diseño del microcontrolador ESP32. (Autores)

La pieza diseñada para dar soporte a todos los componentes electrónicos se realiza de forma tal que el usuario que interactúe con el banco de pruebas realice los cambio y se puedan visualizar de forma correcta y sea más accesible, de la misma manera se tiene en cuenta todos los apoyos y ranuras para las tuercas y cables al momento de mandarse hacer en la impresora 3D, deber ser un componente de estructura rígida y capaz de llevar los componentes antes nombrados, en la Figura 3.36 se muestra la pieza que se diseñó para soportar los componentes electrónicos.

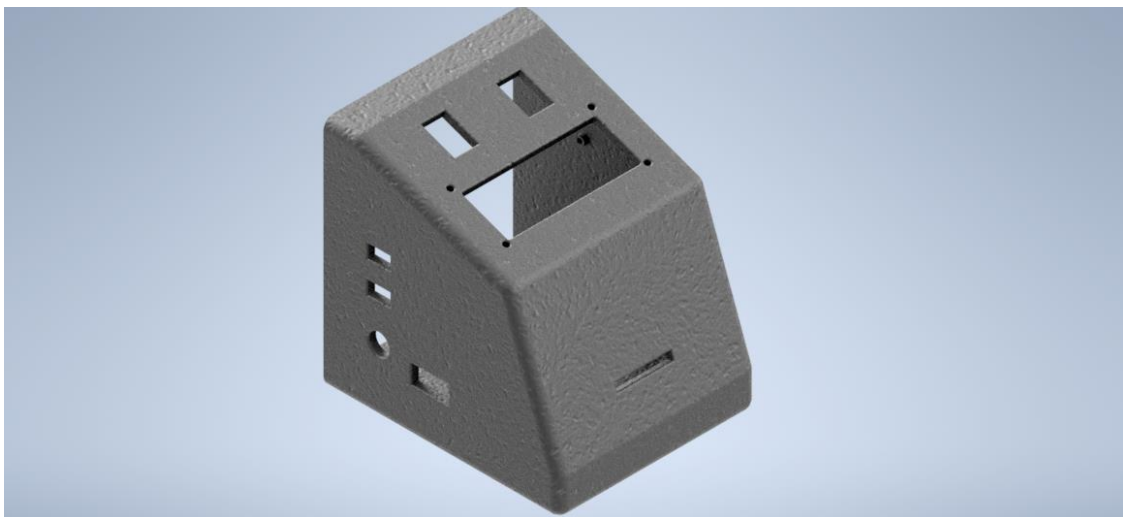


Figura 3.36. Soporte PCB y componentes electrónicos. (Autores)

3.3. Diseño y construcción del circuito para el banco de ángulo de ataque

Un banco de control del ángulo de ataque como el propuesto en este proyecto requiere de una buena exactitud debido a la variación en bajos valores cuando de ángulos se habla, por lo tanto, se seleccionaron elementos que cumplan con la mayor cantidad de requerimientos posibles.

Dichos elementos se ven contemplados en el siguiente circuito ubicado en la Figura 3.37, desarrollado en el software para ingeniería Fritzing y se profundizaran en la siguiente sección.

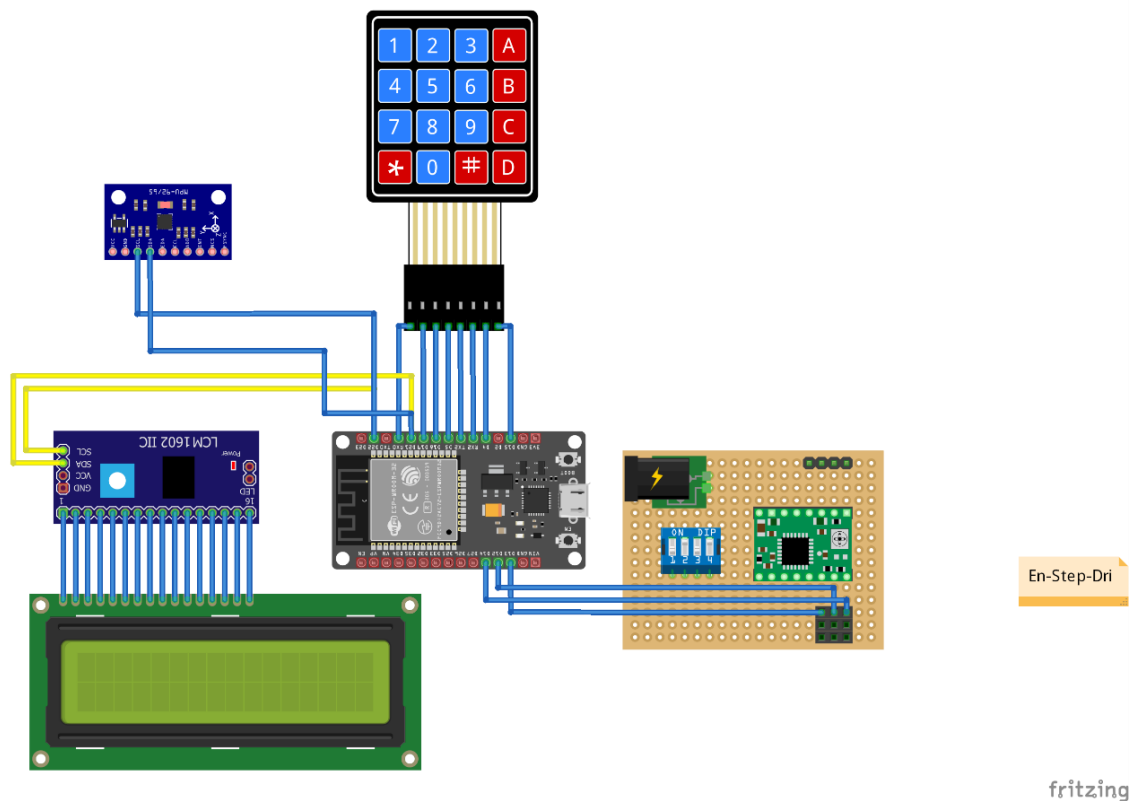


Figura 3.37 Esquemático circuito electrónico. (Autores)

3.3.1. Elementos electrónicos presentes en el BCAA

La Figura 3.37 permite visualizar componentes y conexión del circuito de control para el BCAA, dichos elementos cuentan con las capacidades suficientes para llevar a cabo el proyecto con una precisión considerable, algunos de los elementos más importantes son.

- **ESP32 DEVKIT V1**

El ESP32 será el microcontrolador o cerebro que se utilizara en el proyecto, es el encargado de la lógica y coordinación de los otros elementos del circuito. Este ofrece conectividad wifi y bluetooth, una alta potencia computacional con entradas y salidas analógicas y digitales que permiten conectar varios elementos al tiempo, también soporta múltiples protocolos de comunicación como pueden ser I2C, SPI, I2S entre otras.

Los ESP 32 como el que se observa en la Figura 3.38, son comúnmente utilizados en el IOT (Internet de las cosas) ya que de forma económica y eficiente permite la integración de una gran cantidad de periféricos como se había dicho anteriormente, esto periféricos pueden ser sensores táctiles capacitivos, sensor de efecto Hall, amplificadores de bajo ruido, interfaz para tarjeta SD, Ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C. Esto permite abarcar una gran cantidad de proyectos los cuales pueden ser altamente escalables gracias a la gran potencia de este dispositivo microcontrolador. (BERTOLETI, 2019)

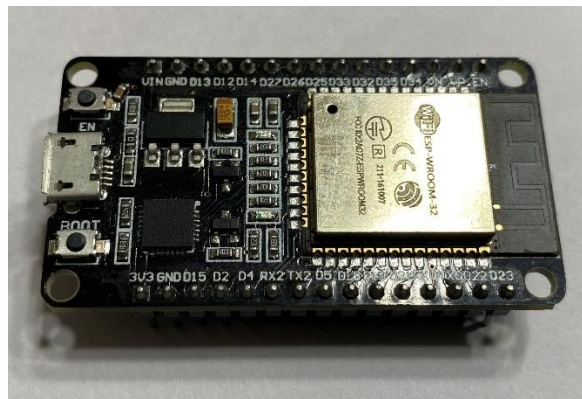


Figura 3.38. Esp32- DevKit V1. (Autores)

- **MPU 9250**

Una IMU o unidad de medida inercial es un dispositivo capaz de captar estados dinámicos como lo son velocidades angulares y aceleraciones, gracias a esto también se pueden estimar y reportar otras medidas de estados dinámicos como la actitud (roll y pitch), o incrementos de la posición o velocidad en el dispositivo electrónico. (uavnavigation.com 2022, 2022)

El MPU 9250 es una IMU de 9DOF (Grados de libertad) el cual internamente contiene una IMU MPU 6500 la cual está conformada por un giroscopio de 3DOF y un acelerómetro de 3DOF. Para completar los 9DOF se agrega un magnetómetro el cual contiene los siguientes 3DOF.

Este dispositivo puede comunicarse mediante comunicación I2C o SPI, dos de las más utilizadas en la industria su consumo es relativamente bajo 3.5mA y entre sus principales características de medición están los conversores analógicos digitales (ADC) de 16bits. El rango del acelerómetro puede ser ajustado a $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, y $\pm 16g$, el del giroscopio a ± 250 , ± 500 , ± 1000 , and $\pm 2000^\circ/\text{sec}$, y el del magnetómetro hasta $\pm 4800\mu\text{T}$. (LLamas, 2016)

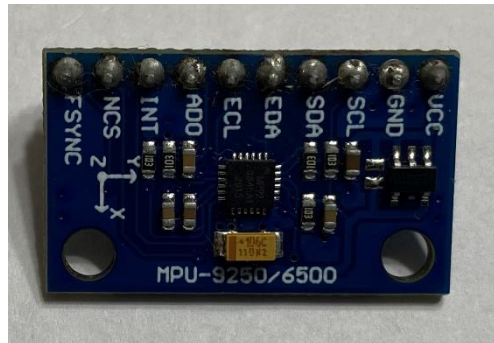


Figura 3.39. MPU9250. (Autores)

- **Driver a4988**

Un controlador o driver es un soporte o apoyo para el control de elementos electrónicos, los cuales facilitan el uso de los mismo, el driver a4988 o también conocido como pololu es una placa de soporte o una placa de arranque con protección a sobre corriente y temperaturas.

Permite regular la corriente máxima de salida por medio de un potenciómetro. Además, posee protección contra sobre corriente y cinco resoluciones diferentes de microstepping. Trabaja con voltajes de alimentación entre 8V a 35V, puede suministrar 1A por bobina sin usar ventilación forzada o un disipador y soporta picos de corriente de hasta 2A. Para manejar el driver solo son necesarios 2 pines, uno para la dirección de giro (DIR) y otro para dar el paso (STEP). El pin Enable debe estar conectado a Tierra (GND) para que el motor funcione. El microstepping se configura con los pines MS1, MS2 y MS3 de acuerdo con la tabla del fabricante.

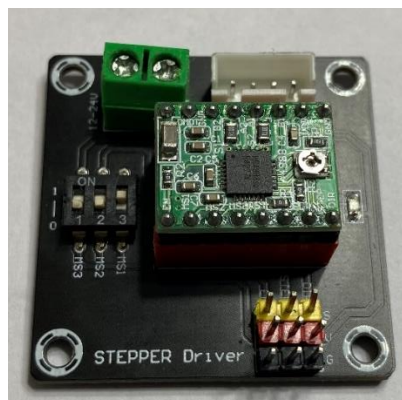


Figura 3.40. Driver a4988. (Autores)

- **42shd0034-20b**

El 42shd0034-20b es un motor paso a paso el cual brinda la precisión necesaria para mover el sistema de acuerdo con los parámetros de entrada. Los motores paso a paso tienen ciertas características que deben ser tenidas en cuenta; no permiten grandes velocidades de giro y permite un posicionamiento preciso de manera sencilla. Existen motores unipolares los cuales suelen tener 5 a 8 cables y bipolares los cuales tienen un par motor al nivel de los unipolares, pero necesitan un control de corriente más complejo, estos cuentan con solo 4 cables.

El 42shd0034-20b el cual se observa en la Figura 3.41, es un motor bipolar de $1,8^\circ$ /paso y por lo tanto girara $1,8^\circ$ cada vez que se le mande un paso. Debido a la precisión que necesita el proyecto con el microstepping se puede regular dicho paso y generar una aproximación lo suficientemente precisa como para satisfacer las necesidades del proyecto.



Figura 3.41. 42shd0034-20b motor paso a paso. (Autores)

- **Otros componentes**

Otros elementos que no tienen alta complejidad electrónica y por lo tanto no tienen su sección, pero están contemplados dentro del trabajo son el teclado matricial 4x4 y la pantalla LCD la cual estará controlada mediante un driver de comunicación I2C, un reductor de voltaje de 12V a 5V para energizar el esp-32 el cual necesita 5V y múltiples interruptores para controlar la energización del circuito.

3.3.2. Diseño esquemático de la electrónica

El software para ingeniería EasyEDA, software en el cual se diseña la PCB que contemplara los elementos electrónicos de este proyecto, realiza la labor de presentar un esquemático completo del proyecto antes de generar los Gerber que son archivos especiales para la impresión de PCB.

La interconexión de los elementos se ve en la Figura 3.42 la cual contiene los elementos anterior mente descritos.

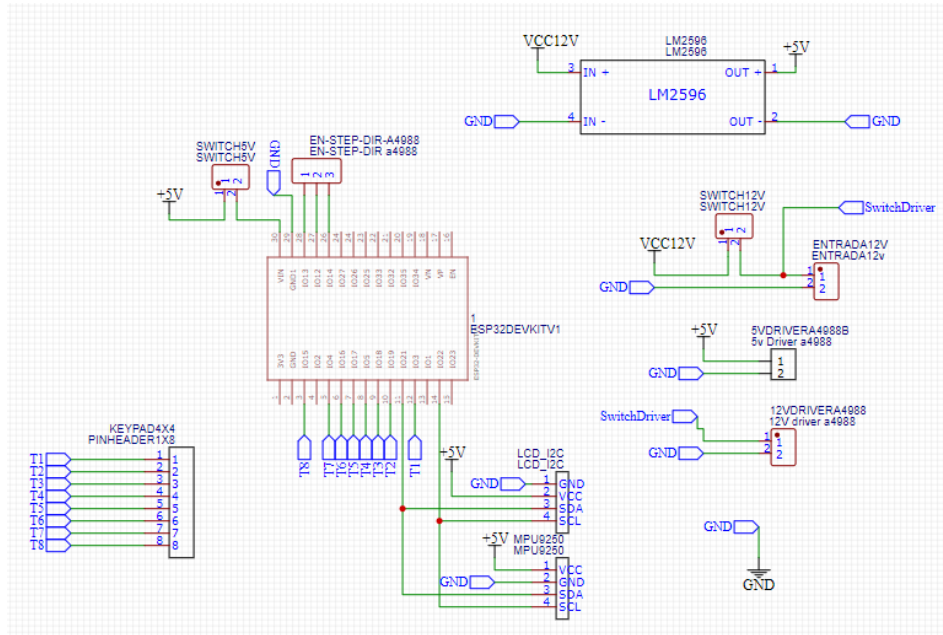


Figura 3.42. Esquemático PCB EasyEDA. (Autores)

- **Circuito PCB**

Como se mencionó anteriormente el software para ingeniería EasyEDA permite desarrollar PCB, por lo tanto, una vez se validan y se verifican las conexiones del esquemático en la Figura 3.43, en el software se debe ubicar los elementos y el recorrido de las pistas las cuáles serán las que transporten la energía y señales para que funcionen los componentes.

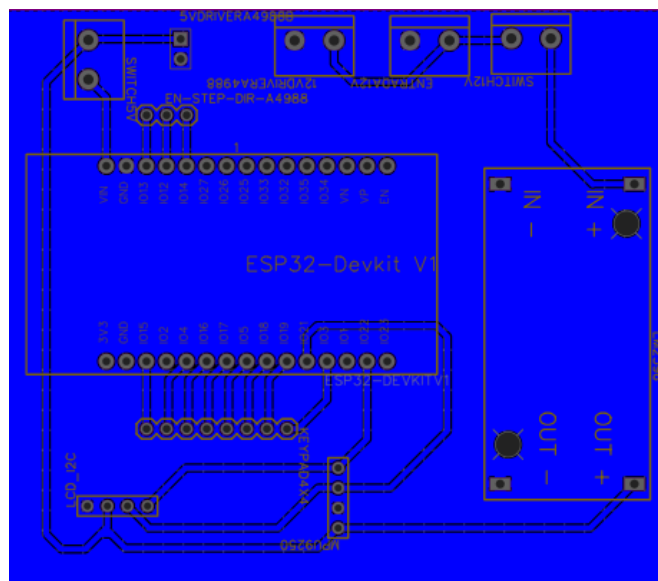


Figura 3.43. PCB EasyEDA. (Autores)

3.3.3. Construcción sistema electrónico

En la sección anterior se muestra el proceso de diseño de la PCB y los componentes que irán en la misma, para esta sección se revela el ensamblaje de los elementos y los demás elementos que sean necesarios para la ejecución del proyecto.

- **Ruteado CNC**

Es primordial comenzar por el proceso de ruteado en CNC la cual llevo a plenitud el desarrollo de la PCB basado en los diseños mostrados anteriormente, tal como se muestra en las figuras Figura 3.44 y Figura 3.45.

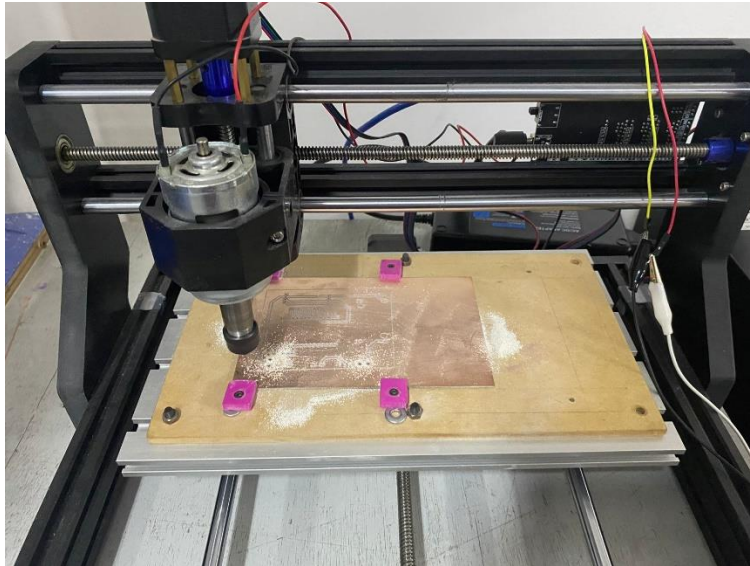


Figura 3.44. Ruteado CNC PCB. (Autores)

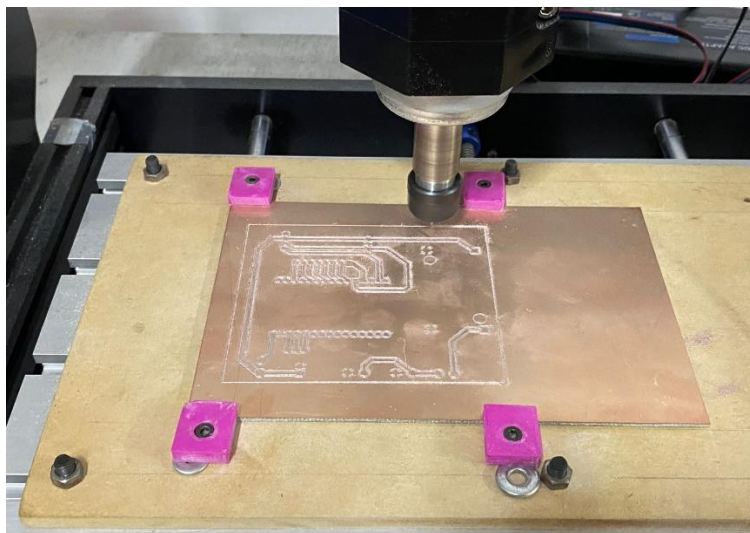


Figura 3.45. Ruteado CNC PCB. (Autores)

- **Soldadura elementos**

Una vez diseñada y construida la PCB se procede a verificar que no haya cortos o alguna ininterrupción en la conducción de las pistas mediante un multímetro.

Posterior a esto se agregan los elementos necesarios y propuestos en el diseño y aplicarle la respectiva soldadura como se observa, dichos elementos van a ser la conexión de los componentes electrónicos necesarios para el proyecto como se observa en las figuras Figura 3.46 y Figura 3.47.

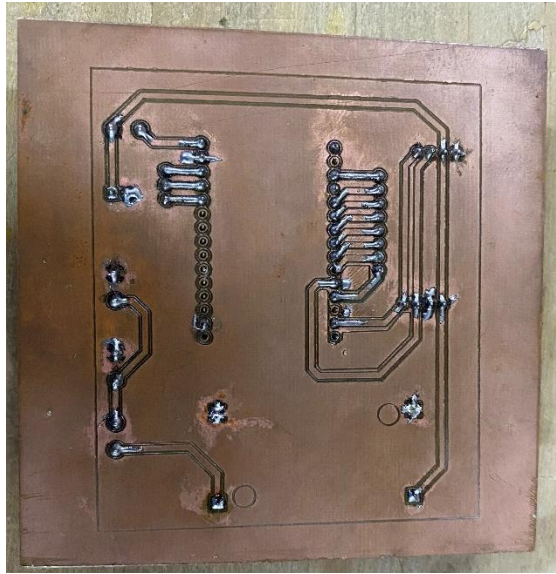


Figura 3.46. PCB con porta elementos electrónicos soldados. (Autores)

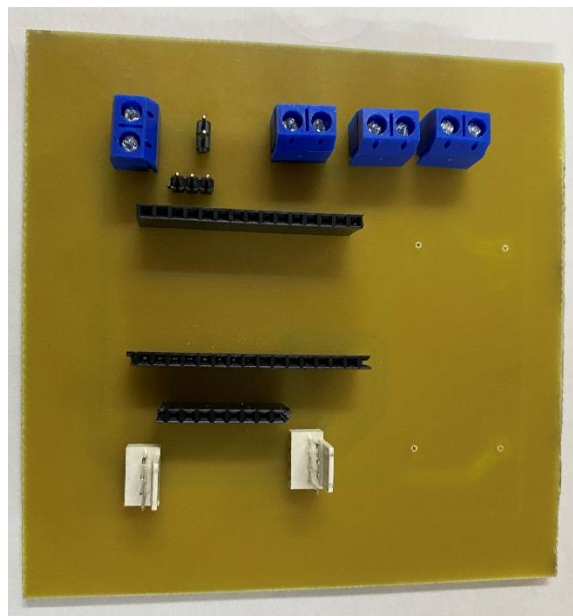


Figura 3.47. Porta elementos electrónicos. (Autores)

3.4. Algoritmo de control sistemas banco de ángulo de ataque

Esta sección relata a gran escala la lógica utilizada para el algoritmo de control del proyecto.

Dicho algoritmo se desarrolló en el IDE de Arduino y comienza declarando las configuraciones iniciales para los distintos elementos electrónicos, tal como se observa en la Figura 3.48.

```
//Configuraciones acelerometro-Giroscopio
#include <MPU9250_WE.h>
#include <Wire.h>
#define MPU9250_ADDR 0x68
MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE(MPU9250_ADDR);

//Configuraciones para el servo
#define pinEnable 13 //Pin enable low4 = motor enciende--- pin enable high = motor apagado
#define pinStep 12 // pin de step para dar los pasos al servo
#define pinDirection 14// pin Step decide el sentido de giro

//Configuraciones del bluetooth
#include <BluetoothSerial.h>
#if !defined(CONFIG_BT_ENABLED) || !defined(CONFIG_BLUEDROID_ENABLED)
#error Bluetooth is not enabled! Please run `make menuconfig` to and enable it
#endif

//Configuraciones LCD
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);//crear un objeto lcd (DIRECCIÓN pantalla, Tamaño x, Tamño y)

//Configuraciones teclado matricial
#include <Keypad.h>
#define ROW_NUM 4 // four rows
#define COLUMN_NUM 4 // four columns

char keys[ROW_NUM][COLUMN_NUM] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};
byte pin_rows[ROW_NUM] = {15, 4, 16, 17};
byte pin_column[COLUMN_NUM] = {5, 18, 19, 3};

Keypad teclado = Keypad( makeKeymap(keys), pin_rows, pin_column, ROW_NUM, COLUMN_NUM );
```

Figura 3.48. Algoritmo de control, configuraciones iniciales. (Autores)

Posterior a esto se presentan la declaración de variables y demás elementos los cuales se deben declarar al principio del código, además de esto se realizan las funciones, las cuales son un bloque de código que realiza una operación.

Entre las variables y funciones declaradas una de las más importante es la función que dicta el movimiento del paso a paso gracias a la lógica computacional descrita en la misma, tal función se observa en la Figura 3.49.

```

//Funcion para el movimiento del paso a paso
void movimiento(int diffGrados){
  digitalWrite(pinEnable,LOW);// low apaga EL MOTOR
  if(diffGrados > 0){
    digitalWrite(pinDirection,HIGH);//Decide el sentido de giro el motor
  }else if (diffGrados < 0 ){
    digitalWrite(pinDirection,LOW);//Decide el sentido de giro el motor
    diffGrados = abs(diffGrados);
  }

  equivalenciaPasos = (diffGrados*paso)/360;

  for(int i = 0; i < equivalenciaPasos; i++){
    digitalWrite(pinStep,HIGH);
    delayMicroseconds(velocidadMotor);
    digitalWrite(pinStep,LOW);
    delayMicroseconds(velocidadMotor);
  }
  digitalWrite(pinEnable,HIGH);// HIGH apaga el APAGA EL MOTOR
}

```

Figura 3.49 Función algoritmo de control paso a paso. (Autores)

Posterior a las funciones del algoritmo se encuentra el Void Setup del código, en dicha sección se ubican las configuraciones iniciales de los elementos presentes en el proyecto como son Bluetooth, protocolos de comunicación I2C para giroscopio y pantalla LCD y demás configuraciones del microcontrolador como se observa en la Figura 3.50.

```

//Configuraciones sistema
//Configuracion inicial de acelerometro y giroscopio

if(!myMPU9250.init()){
  Serial.println("MPU9250 does not respond");
}
else{
  Serial.println("MPU9250 is connected");
}
Serial.println("Position you MPU9250 flat and don't move it - calibrating...");
delay(1000);
myMPU9250.autoOffsets();
Serial.println("Done!");
myMPU9250.setAccRange(MPU9250_ACC_RANGE_2G);
myMPU9250.enableAccDLPF(true);
myMPU9250.setAccDLPF(MPU9250_DLPF_6);

BT.begin("ESP32_AOT"); // Nombre de dispositivo Bluetooth

//Configuracion pines para paso a paso
pinMode(pinEnable, OUTPUT); //Enable
pinMode(pinStep, OUTPUT); //Step
pinMode(pinDirection, OUTPUT); //Direction
digitalWrite(pinEnable,HIGH);// low enciende el motor ---high apaga el motor

//Fin configuraciones

```

Figura 3.50 Configuraciones iniciales algoritmo de control. (Autores)

En el ciclo Void Loop ira toda la lógica del algoritmo de control, en el cual se inicia por la captura de la tecla de un teclado matricial 4X4 para seleccionar el modo de trabajo del sistema como se observa en la Figura 3.51.

```
//Este if verifica el sistema no este en modo bluetooth con el fin de trabajar con el teclado
if(bandBth==false)tecla = teclado.getKey();//Reconocimiento de tecla

//Este if es el que me decide el modo de trabajo(teclado o bluetooth)
if(tecla && (bandMode == false)){
  switch(tecla){
    case('A'):
      bandKeypad=true;
      bandMode= true;
      tecla = ' ';//Esta asignacion se hace con el fin de no arrastrar el valor de tecla haci el siguiente if
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print(" Modo teclado ");
      delay(2000);
      break;
    case('B'):
      bandBth=true;
      bandMode=true;
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print(" Modo bluetooth ");
      break;
    default:
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("Modo no valido");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("Seleccione A o B");
      delay(2000);
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("A:Modo bluetooth");
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("B:Modo teclado");
      break;
  }
}
```

Figura 3.51 Selección modo de trabajo algoritmo de control. (Autores)

Posterior a esto se despliega un segundo menú (si se ha seleccionado el modo teclado) el cual permite mover los grados deseados sean de carácter positivo o negativo con su respectiva lógica para lograrlo, además un retorno a el grado 0, retorno al menú principal y con la tecla '#' se puede monitorear el estado del ángulo del giroscopio. Una sección de dicho código se puede observar en la Figura 3.52.

```

//Condicionales para el trabajo con el teclado
if(tecla && (bandMode == true) && (bandKeypad == true)){ //verificacion de modo seleccionado y modo keypad activas
  if((tecla == 'A' || tecla == 'B' || tecla == 'C') && capturaString == false){ //Seleccion de opcion
    switch(tecla){

      case('A'):
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Ang + de valor:");
        capturaString=true;
        break;

      case('B'):
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Ang - de valor:");
        bandB=true;
        capturaString=true;
        break;

      case('C'):
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Volviendo a 0...");
        angulo();
        float redondeo = redondear(anguloFloat,0);
        int anguloInt = int(redondeo);
        diffGrados=0-anguloInt;
        movimiento(diffGrados);
        gradosActuales=0;
        delay(2000);
        retornoMenu();
        Serial.print("Volviendo a 0");
        Serial.print(redondeo);
        Serial.print(anguloInt);
        Serial.print(anguloFloat);
        break;
    }
  }
}

```

Figura 3.52 Algoritmo de control modo teclado. (Autores)

3.5. Sistema de control Bluetooth

Como se ha mencionado el Esp32 cuenta con un sistema de modulo Bluetooth, dicho sistema es BLE es decir Bluetooth Low Energy, este realiza consumos muy bajos y gracias a su versión 4.2 está bastante optimizado para trabajo con baterías.

Para el desarrollo del proyecto se conecta el módulo Bluetooth del Esp32 con una interfaz/aplicación que nos permita la visualización en tiempo real de lo que está sucediendo con el sistema. Para realizar esto se utilizó la aplicación para dispositivos Android desarrollada en Kodular.

Kodular es una plataforma de desarrollo de aplicaciones móviles que permite a los usuarios crear aplicaciones sin necesidad de conocimientos avanzados de programación. Con Kodular, pueden diseñar aplicaciones Android de manera intuitiva utilizando una interfaz gráfica de usuario. Además, Kodular proporciona componentes y herramientas para facilitar la comunicación con otros dispositivos a través de Bluetooth. Los usuarios pueden crear aplicaciones que se conecten y compartan datos con dispositivos Bluetooth sin necesidad de escribir código complejo. Es una solución accesible y amigable para aquellos que desean crear aplicaciones con funcionalidad Bluetooth sin experiencia previa en programación. En la Figura 3.53. se observa la interfaz de uso.

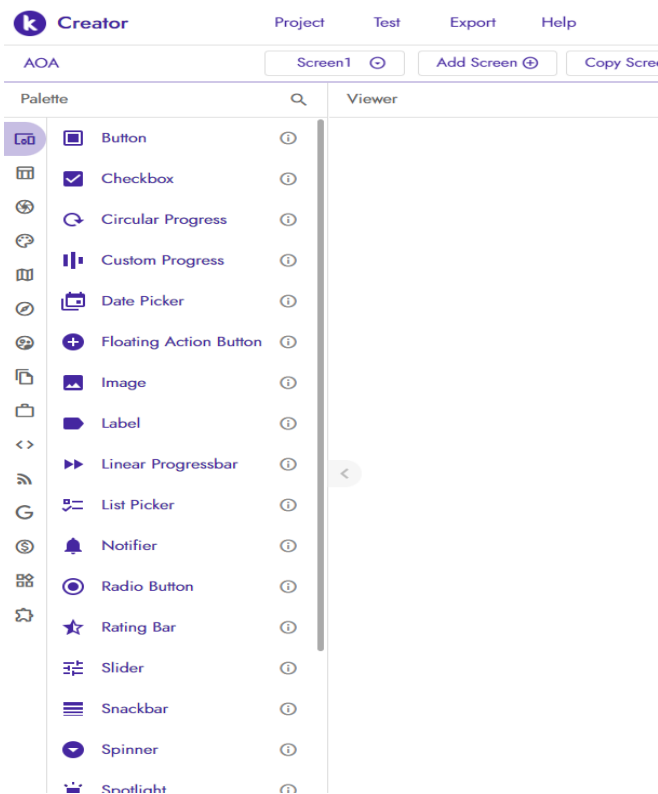


Figura 3.53. Kodular panel de inicio. (Autores)

La configuración de los paneles es a gusto del usuario creador de acuerdo con las necesidades del proyecto, para el desarrollo de un banco de control de ángulo de ataques para perfiles aerodinámicos en un túnel de viento se optó por utilizar el panel de la Figura 3.54.



Figura 3.54. Panel principal control de ángulo de ataque. (Autores)

Dicho panel contiene elementos que pueden tanto enviar como recibir datos mediante la comunicación inalámbrica Bluetooth. Elementos como el Angulo Deseado y Angulo 0 tienen dicha capacidad de enviar datos introducidos mediante la aplicación hacia el Esp32 para que este posteriormente los procese y realice las tareas necesarias ante dicho comando.



Figura 3.55 Configuración ángulo deseado aplicación. (Autores)

Como se observa en Figura 3.55 la configuración del panel para el ángulo deseado contiene una configuración (esquina inferior derecha) especial dicha configuración envía un carácter finalizador el cual permite que el microcontrolador Esp32 entienda que se han enviado los datos necesarios y no necesita recibir más información por el momento, para este panel el carácter finalizador que se ubica en el botón de “send” de la Figura 3.55 es un “#”.

Los otros elementos como ángulo cero y giroscopio tienen la configuración necesaria para cada una de sus funciones, la información será captada cuando se envíe una trama compuesta por un carácter de inicio y final semejantes para que se pueda visualizar el ángulo en el que se ubique el giroscopio y por su parte el ángulo cero envía el comando necesario para que este retorne al mismo, como se observa Figura 3.56.



Figura 3.56 Configuración giroscopio y ángulo cero. (Autores)

Para finalizar se puede visualizar la programación de bloques, la cual cumple con la lógica necesaria para enviar y transmitir los datos que necesite el sistema para su correcto funcionamiento, esto se puede observar en la Figura 3.57.

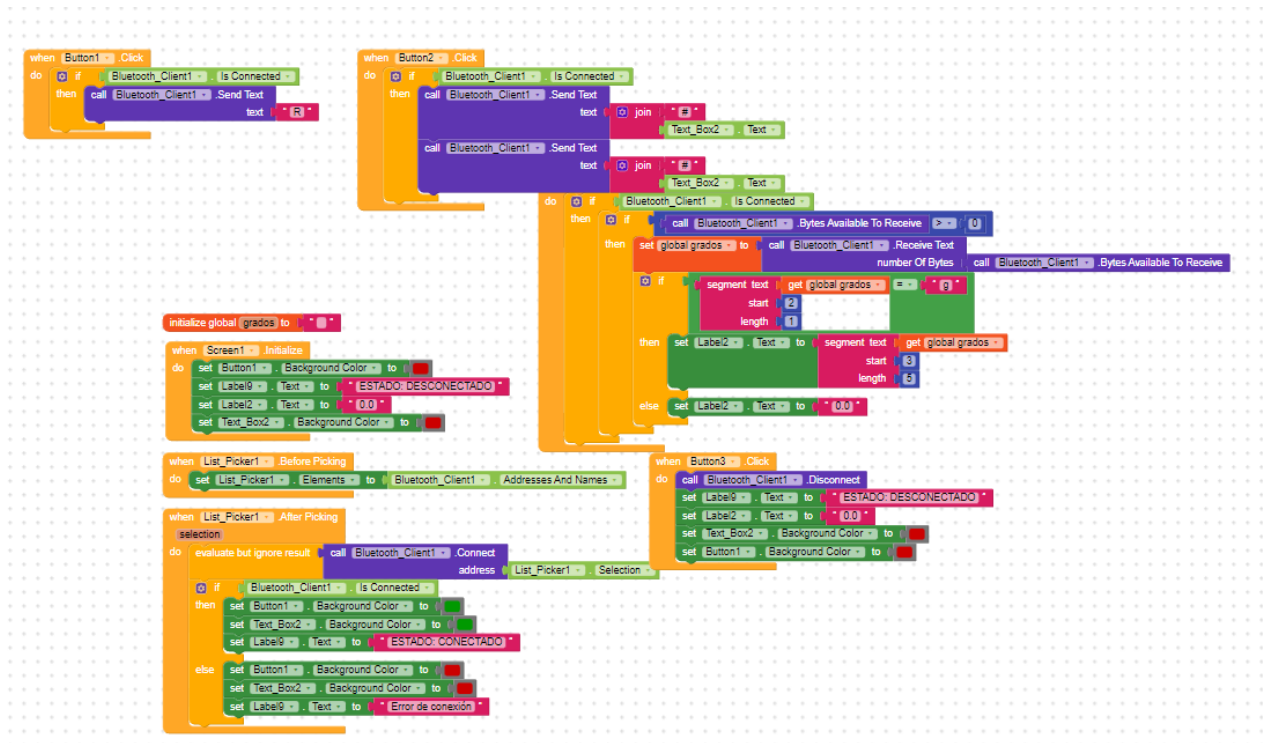


Figura 3.57 Programación de bloques Kodular. (Autores)

CAPÍTULO 4

4. Resultados

4.1. Diseño asistido por computador (CAD)

El primer resultado es el diseño mecánico que ha permitido generar un render en 3D del prototipo mediante un software de diseño, mostrando de manera clara el montaje completo del mismo, incluyendo todas las piezas que lo conforman. En la Figura 4.1 se muestra la primera parte del diseño mecánico.

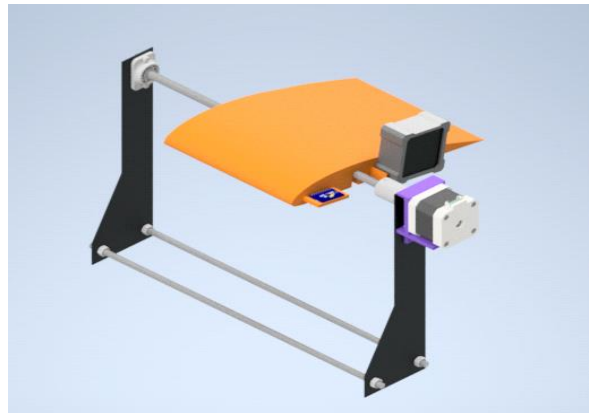


Figura 4.1 Diseño mecánico final. (Autores)

El diseño mecánico se complementa con el panel de control que gestiona el motor paso a paso y se retroalimenta del giroscopio, además de la navegación por los menús que se visualizan en la LCD a través del teclado. La unión de todos los elementos electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento del sistema ha permitido crear un ensamblaje mecánico funcional y reducido, en la Figura 4.2 se muestra el diseño del panel de control del banco



Figura 4.2. Diseño mecánico del panel de control. (Autores)

4.2. Construcción circuito electrónico

Como se mencionó en el capítulo anterior el sistema electrónico fue desarrollado sobre una placa de circuito impreso o PCB desarrollado en el software para ingeniería EasyEDA y maquinado sobre un ruteador CNC.

Una herramienta de ingeniería como EasyEDA no solo permite ver el esquemático de la PCB como se ve en la Figura 3.43 del capítulo anterior, también permite ver un modelo 3D el cual representa una versión real del circuito impreso, tal cual como se ve en la Figura 4.3.

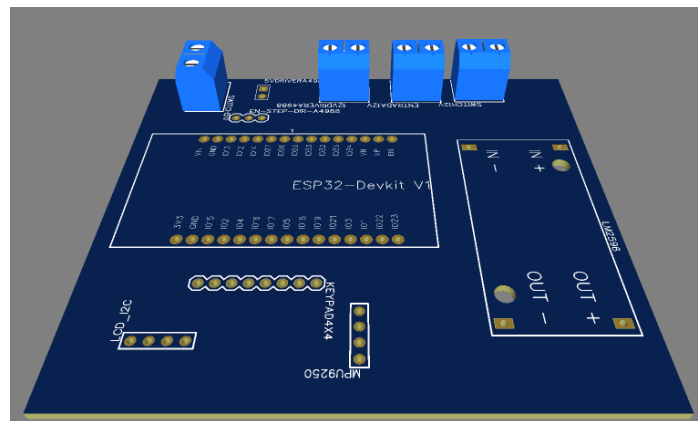


Figura 4.3. Vista 3D PCB EasyEDA. (Autores)

Como resultado del diseño electrónico expuesto en el anterior capítulo y figura, se logró un circuito impreso que permite integrar todos los módulos electrónicos necesarios para el funcionamiento del prototipo en una misma tarjeta y con la posibilidad de ser fácilmente reemplazados en caso de una avería en un módulo específico.

El circuito impreso final con sus respectivas líneas y puntos de contacto se puede observar en la Figura 4.4.

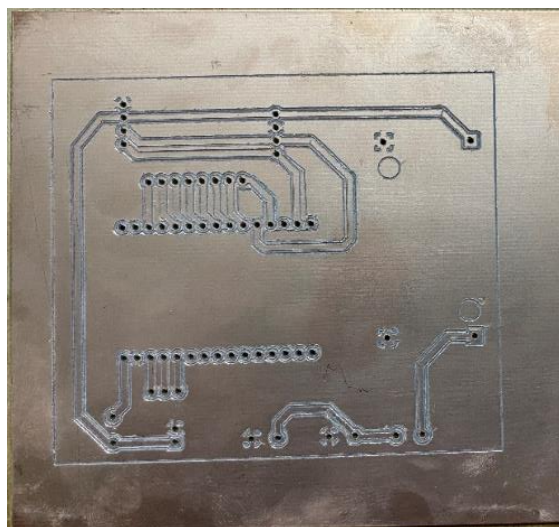


Figura 4.4. Circuito impreso final. (Autores)

Los componentes que integran el circuito fueron expuestos en el capítulo anterior, el acople de estos con el circuito impreso da como resultado un circuito electrónico lo suficientemente robusto como para desarrollar el banco de control de ángulo de ataque, dicho circuito se observa en la Figura 4.5.

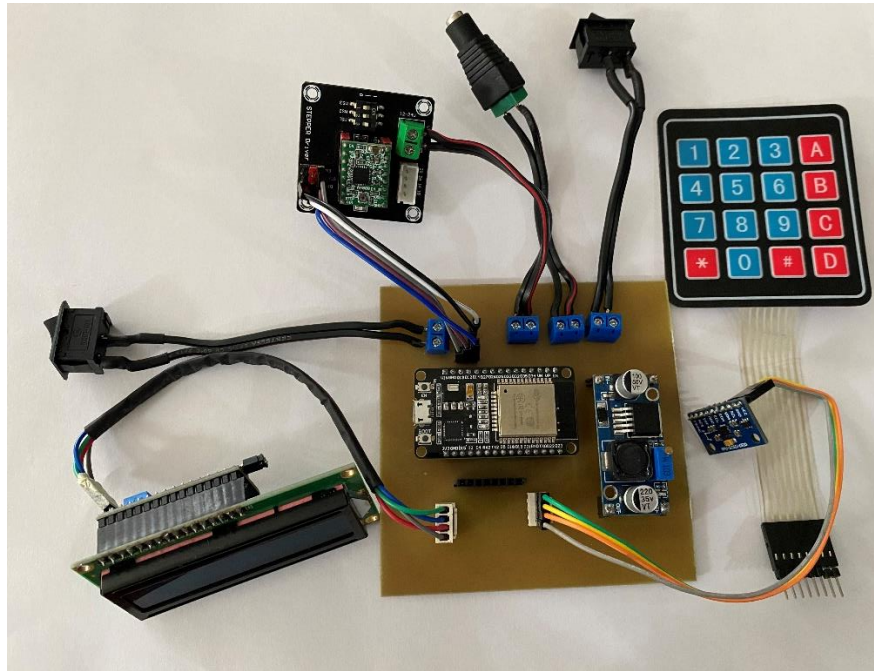


Figura 4.5. Electrónica del banco. (Autores)

En la figura anterior el teclado matricial no permite la correcta visualización del circuito, por lo tanto, no está conectado, sin embargo, en la Figura 4.6 se puede ver la ubicación de conexión de este.

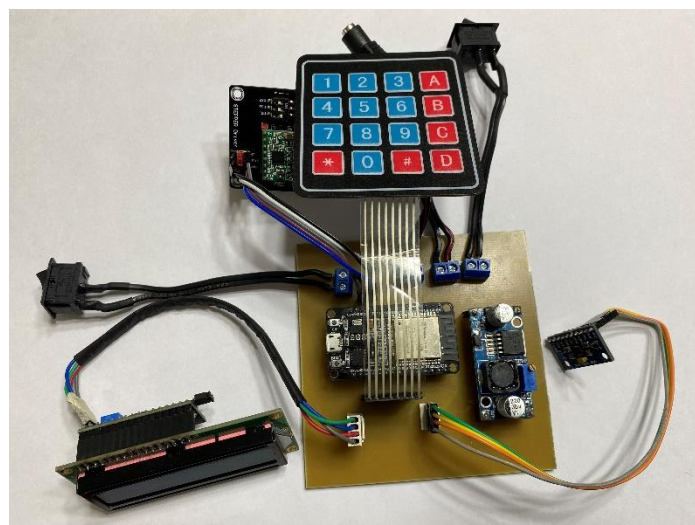


Figura 4.6. Electrónica completa. (Autores)

Como resultado final de esta sección se puede visualizar en la Figura 4.7 el montaje del circuito electrónico con su respectiva carcasa que facilitara su transporte, la maniobrabilidad y visibilidad de los elementos electrónicos, dichos elementos se pueden observar en la Figura 4.8.



Figura 4.7. Carcasa protectora electrónica. (Autores)



Figura 4.8. Carcasa protectora electrónica (vista interna). (Autores)

4.3. Banco de control

El diseño mecánico definió los estándares de desarrollo para el banco que soportara el sistema mecánico y electrónico del proyecto, el conjunto de elementos ya expuestos cumple con los requerimientos del proyecto, aplicando con buena resolución los ángulos que se ingresan de manera física mediante teclado y vía bluetooth mediante el aplicativo móvil.

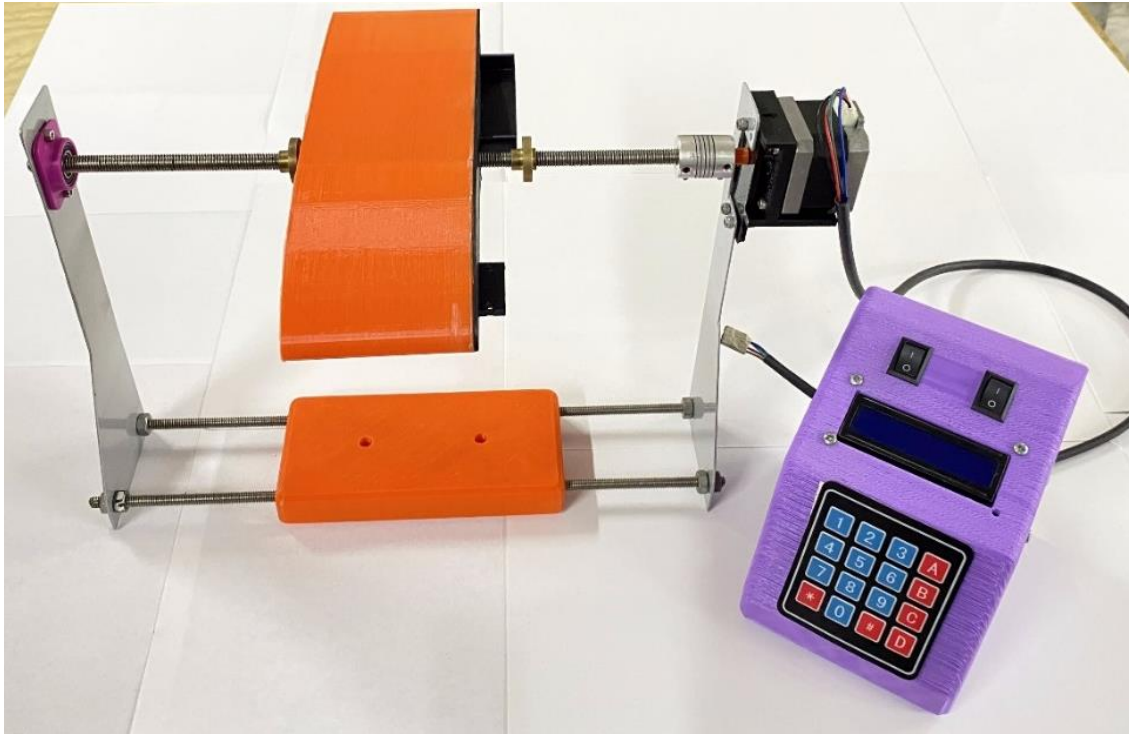


Figura 4.9. Banco de control ángulo de ataque para perfiles aerodinámicos en un túnel de viento. (Autores)

4.4. Aplicación móvil

La interfaz para el desarrollo de aplicativos móviles desarrollada en Kodular cumplió con el desarrollo del proyecto, brindando las herramientas necesarias para desarrollar una aplicación lo suficientemente capaz para cumplir las necesidades del proyecto, dicha interfaz se puede observar en la Figura 4.10.



Figura 4.10. Interfaz aplicación. (Autores)

En la Figura 4.11 se observa a la aplicación esperando a que se conecte un dispositivo, esta sección mostrara todos los dispositivos bluetooth que se ubiquen en un área cercana al dispositivo móvil, sin embargo, se debe seleccionar la opción que tenga como nombre ESP32_AOT que muestra el nombre del proyecto utilizado.



Figura 4.11. Aplicación móvil, esperando ingreso de ángulo. (Autores)

En la Figura 4.12 se observa el momento en el que la aplicación está conectada al dispositivo, además se observa como en el apartado de giroscopio, la aplicación muestra en todo momento dicho valor en el que se encuentra el sensor.



Figura 4.12. Aplicación móvil, conectado. (Autores)

4.5. Pruebas

La ubicación final del banco será un túnel de viento el cual permita generar el fluido que transitará sobre el perfil y permitirá observar el comportamiento de este al interactuar y modificar el ángulo de ataque, esto se observa en la

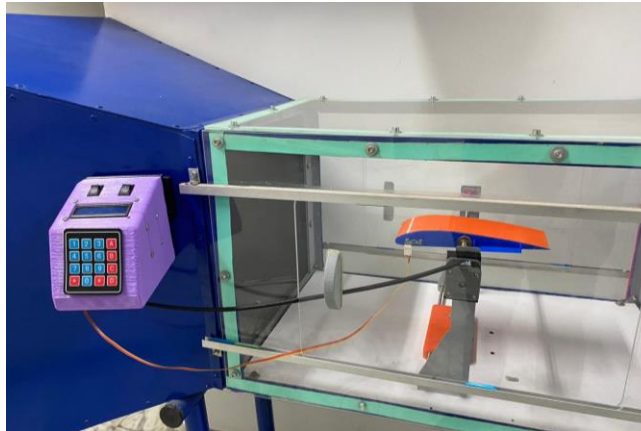


Figura 4.13. Banco de control de ángulo de ataque en un túnel de viento. (Autores)

Durante todo el documento se ha hecho énfasis sobre el ángulo de ataque en los perfiles aerodinámicos, es importante enfatizar que dicho ángulo está comprendido por la selección y caracterizar los rangos teóricos del ángulo de ataque para los distintos perfiles aerodinámicos de los cuales se decide estandarizar en un rango de -15° y 15° , con el fin de obtener resultados que en la medida de lo posible sean comparables con el comportamiento de un perfil aerodinámico real.

A dicho rango estandarizado se le hicieron las suficientes pruebas para demostrar el comportamiento exitoso del proyecto, dichos rango se ve contemplando en las siguientes figuras con su ángulo correspondiente en un túnel de viento.

En Figura 4.14 la se observa un valor de 0° tanto en giroscopio (muy aproximado a 0) como en inclinómetro, el cual es la herramienta de validación para el sistema.



Figura 4.14. Banco de control de ángulo de ataque a 0° . (Autores)

A continuación, se observa en la Figura 4.15 un valor de 5° y posteriormente en la Figura 4.16 un valor de -10° los cuales sirven como verificación de la correcta medición y comparación del ángulo de ataque realizada por el banco.

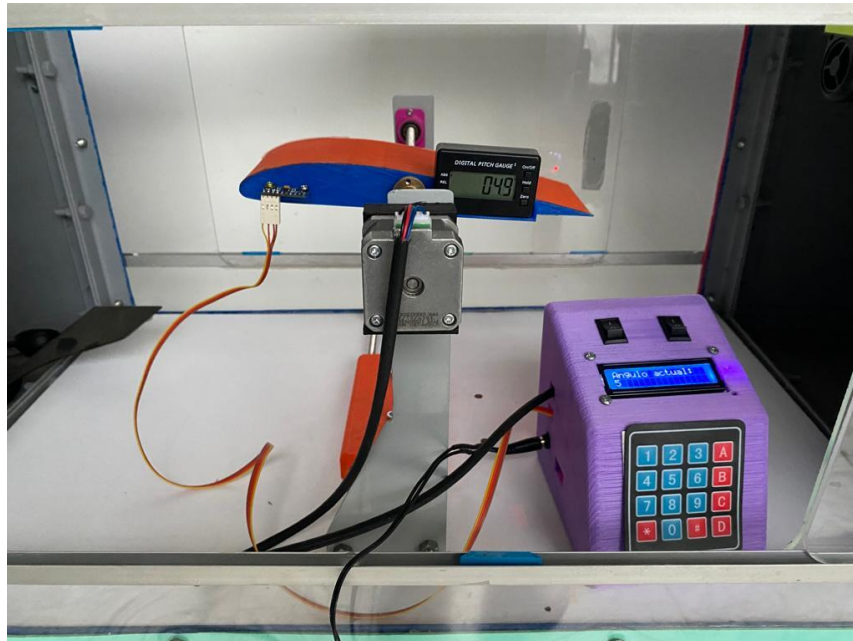


Figura 4.15. Banco de control de ángulo de ataque a 5° . (Autores)



Figura 4.16. Banco de control de ángulo de ataque a -10° . (Autores)

En las anteriores figuras se ve el proyecto siendo controlado por el teclado matricial, pero el motivo principal de la implementación del Esp-32 es la posibilidad de trabajar con bluetooth la cual nos permite mayor movilidad al momento de utilizar el banco de control. Dicha utilización se observa en las siguientes figuras.

En la Figura 4.17 se observa a la aplicación en el ángulo muy próxima a 5°, indicando en el apartado de giroscopio que efectivamente esta es la posición que se indica en el inclinómetro.

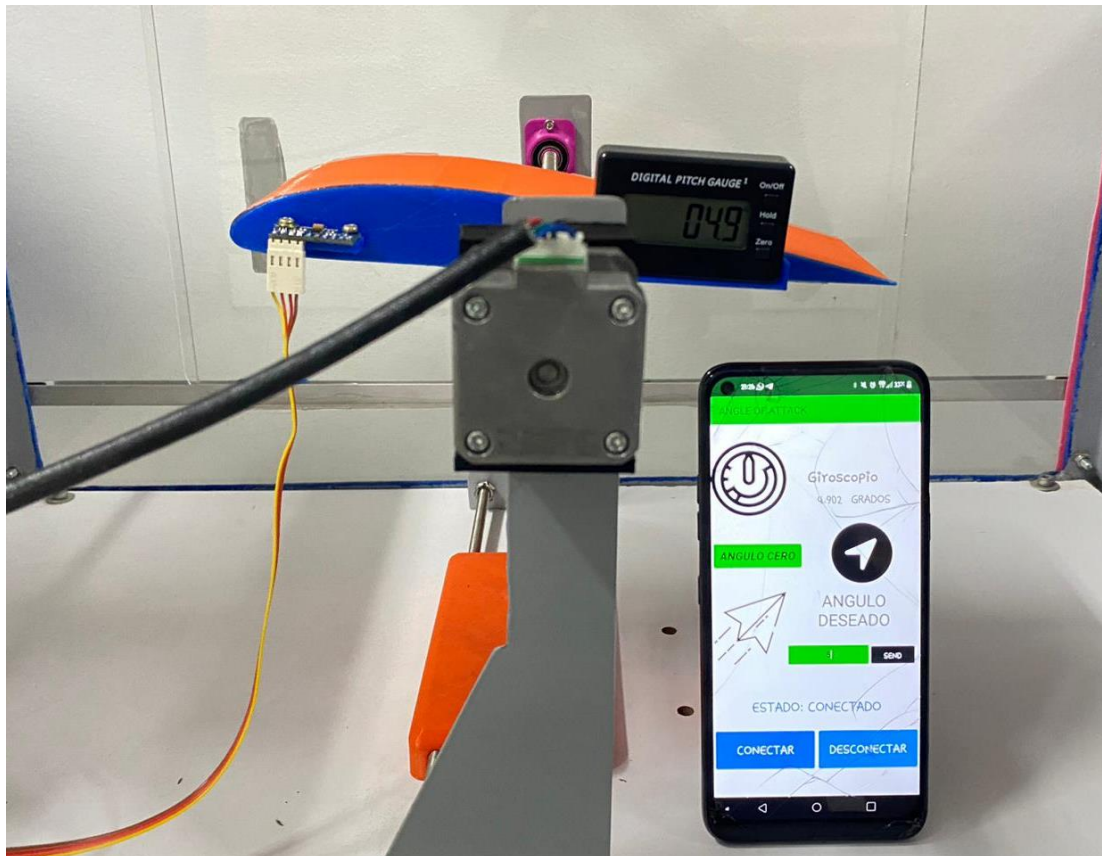


Figura 4.17. Banco de control ángulo de ataque modo bluetooth a 5° Kodular. (Autores)

En la se observa a la aplicación en un ángulo de y siendo verificada por el apartado de giroscopio y la herramienta de comparación, el inclinómetro.

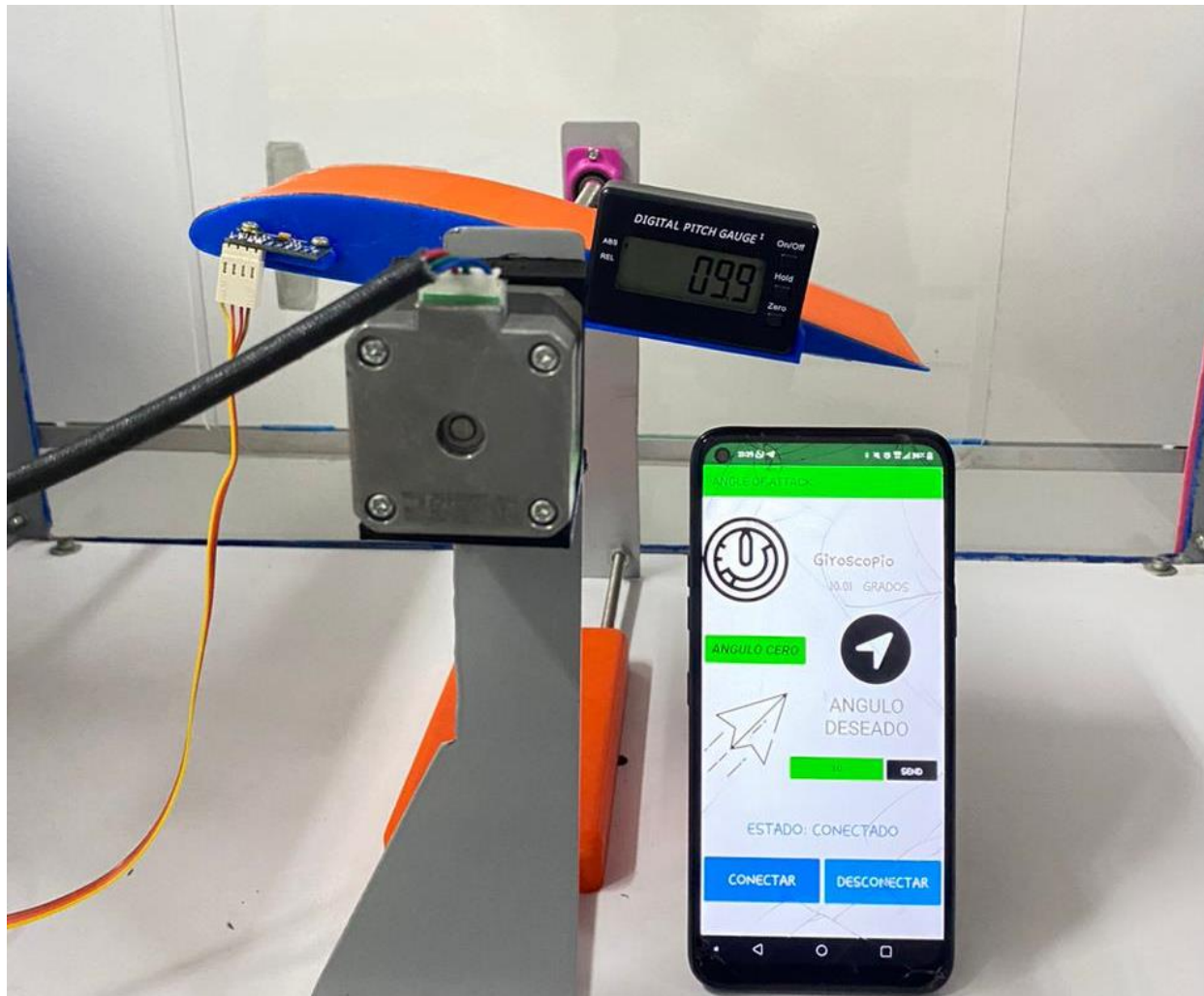


Figura 4.18. Banco de control ángulo de ataque modo bluetooth a 10° Kodular. (Autores)

5. Conclusiones

- Gracias a la manufactura de impresión 3D se logró construir las piezas mecánicas para el correcto funcionamiento del banco y poder medir el ángulo de ataque del perfil.
- Con base en las tecnologías de ruteado y prototipado CNC se logró construir un circuito impreso y realizar pruebas de conexiones en el mismo.
- Con las tecnologías disponibles de libre acceso como el IDE de Arduino se lograron realizar las configuraciones tanto de programación como de control de los sistemas de medición y retroalimentación del prototipo final.
- Con todas estas tecnologías disponibles se logró realizar una integración a través de una aplicación móvil para leer, controlar y verificar la variable del prototipo AOA.
- A través de este tipo de proyectos es posible apropiarse los conceptos y conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Mecatrónica.
- El microcontrolador que se usó en el proyecto es el adecuado por su fácil adquisición y por el módulo bluetooth, además que el IDE de Arduino facilita la programación por las librerías creadas.
- El comportamiento del fluido sobre un perfil varía de acuerdo con el tipo y forma del perfil, diferenciándose por el flujo laminar que transita sobre el mismo.
- La aplicación de este proyecto en una práctica educativa tendrá una interiorización del concepto del ángulo de ataque muy importante ya que se analizará la caracterización del fluido y sus afectaciones en los perfiles aerodinámicos.

6. Recomendaciones

- Al ser un prototipo, se recomienda usar un motor paso a paso de mayor precisión y con mayor torque, ya que mejora la precisión del ángulo que se quiere medir.
- Con el banco de pruebas se puede validar con distintos diseños a escala de perfiles aerodinámicos teniendo en cuenta las dimensiones con el que se creó el prototipo.
- El banco de pruebas se pudo realizar teniendo en cuenta que ya se había realizado el proyecto del túnel de viento, con el fin de enlazar distintos proyectos que tengan correlación.
- Optimizar el sistema mecánico para evitar pérdidas o desfases de movimiento del motor paso a paso.
- Al momento de iniciar a trabajar con el banco se debe ajustar el inclinómetro a 0° debido a que de acuerdo con la posición en la que se encuentre el giroscopio, este la tomara con ángulo 0°, y todas las mediciones arrancaran desde dicho punto inicial.
- Para replicar la aplicación en cualquier dispositivo se debe descargar el apk que se ubica en el siguiente enlace.

https://drive.google.com/drive/folders/11oj4KxPE5s_IrlxKqTrloqlo6pcgQQas?usp=sharing

- El código de Arduino se ubica al final, en la sección de anexos, pero también se puede encontrar en el siguiente enlace.

https://drive.google.com/drive/folders/11oj4KxPE5s_IrlxKqTrloqlo6pcgQQas?usp=sharing

- En cualquiera de los enlaces anteriores puede encontrar un manual de uso del dispositivo

7. Bibliografía

- Airfoil Tools. (22 de Agosto de 2022). *Airfoil Tools*. Obtenido de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il>
- Ardobot Robótica SAS. (24 de Abril de 2023). *Ardobot Robótica*. Obtenido de Ardbot : <https://www.ardobot.co/motor-a-paso-a-paso-nema-17-17hs4401.html>
- Asensio Grima, C. M., Giménez Fernández, A., Lozano Cantero, F. J., & Pérez Salmerón, J. C. (Sin fecha). *España, Almeria Patente nº P201201028*.
- Autodesk Inc. (20 de Septiembre de 199). *Autodesk Inc.* Obtenido de <https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview>
- Axalta Coating Systems . (22 de Agosto de 2022). *Axalta Coating* . Obtenido de Axalta Coating Systems : https://www.axalta.com/blog_mx/es_ES/pintura_industrial/ques-pintura-electroestatica-como-funciona-y-sus-beneficios.html
- BERTOLETI, P. (2019). *PROYECTOS CON ESP32 Y LORA*. Sao Pablo: NCB EDITORA.
- C.A Quispe Gonzales*, W. U. (2014). Diseño aerodinámico de un túnel de viento de bajas velocidades. *Revista De Investigación De Física* , 17, 12.
- Campe, R., Campe, T., & Norbert, E. L. (04 de Julio de 2011). *España Patente nº 07075909* .7.
- Carreras universitarias de Colombia. (Sin fecha). *Carreras universitarias*. Obtenido de <https://carrerasuniversitarias.com.co/carreras/ingenieria-aeronautica>
- Custom Part. (22 de Agosto de 2022). *Custom Part*. Obtenido de CustomPartNet: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- Cybermetrics Lab. (Sin fecha). *Ranking web de universidades*. Obtenido de https://www.webometrics.info/es/Latin_America_es/Colombia
- Deingenierias. (10 de Abril de 2022). © 2022 *Deingenierias.com* . Obtenido de Deingenierias.com Web site: <https://deingenierias.com/software/easyeda/>
- Dynamic Flight*. (2017). Recuperado el 13 de 11 de 2021, de http://www.dynamicflight.com/aerodynamics/relative_wind/
- EcuRed*. (12 de 11 de 2021). Obtenido de <https://www.ecured.cu/Aerodinamica>
- Edae education. (22 de Agosto de 2022). *Escuela de aviacion especializada* . Obtenido de https://www.edae.education/pluginfile.php/2741/mod_resource/content/1/MANUAL%20AERODINAMICA%20I.pdf
- Exone. (8 de Agosto de 2022). *Exone.com*. Obtenido de <https://www.exone.com/en-US/resources/case-studies/what-is-binder-jetting>
- Fernandez de Dios, J. J., & Caride Ulloa, J. (8 de Agosto de 2022). *MyElectronic*. Obtenido de http://myelectronic.hostfree.pw/Componentes/pcbs_preliminar.pdf?i=2
- Fritzing GmbH. (s.f.). *Fritzing* . Recuperado el 2022 de Enero de 4, de <https://fritzing.org/>
- GrabCAD. (s.f.). *Grabcad Community*. Recuperado el 2022 de Enero de 27, de <https://grabcad.com/library>

- Infobae. (22 de Julio de 2021). *Infobae.com*. Obtenido de <https://www.infobae.com/america/colombia/2021/07/22/institucion-educativa-de-medellin-construyo-el-primer-avion-electrico-del-pais/>
- ITI. (08 de Agosto de 2022). *ITI a wipipro company* . Obtenido de <https://www.iti-global.com/cad-to-cam>
- Jackson, B. (15 de Agosto de 2018). *3D Printing Industry*. Obtenido de <https://3dprintingindustry.com/news/innovate-uk-grants-6m-to-national-aerospace-additive-manufacturing-project-138183/>
- Jiménez García, M. (28 de Febrero de 2020). *Repositorio Institucional UMNG*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2021, de <http://hdl.handle.net/10654/35775>
- Kaupila, I. (26 de Abril de 2022). *All3dp*. Obtenido de <https://all3dp.com/1/what-is-material-jetting-3d-printing-basics/>
- LLamas, L. (26 de Septiembre de 2016). *Luis Llamas Ingeniería, informática y diseño*. Obtenido de Luis Llamas Web site: <https://www.luisllamas.es/usar-arduino-con-los-imu-de-9dof-mpu-9150-y-mpu-9250/>
- Loaiza Corvoda, C. (2010). *Repositorio Digital UIDE*. Obtenido de <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/707>
- Megger. (22 de Agosto de 2022). *Commons*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clark_YH_\(cropped\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Clark_YH_(cropped).JPG)
- Mejia, A. M. (2012). DISEÑO Y ANÁLISIS COMPUTACIONAL PARA TÚNEL DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD. *UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR* , I, 156.
- NASA TV. (5 de Abril de 2017). (NASA) Recuperado el 13 de 11 de 2021, de <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html>
- Orozco, J. (24 de Agosto de 2019). *Laminas y Aceros de Yucatán*. Obtenido de Laminas y Aceros: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/qu%C3%A9-es-la-manufactura-aditiva>
- Perez Hidalgo , A., Perez Berenguer, E., & Perez, M. A. (2007). *Universidad nacional de San Juan*. Obtenido de <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>
- Piccirillo, A. (2000). *Semantic* . Obtenido de The Clark Y Airfoil: A Historical Retrospective: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Clark-Y-Airfoil%3A-A-Historical-Retrospective-Piccirillo/14d485fa945e1ea56fd6e975d090b4067d08b02a#citing-papers>
- Pinzón Paz, S. (27 de Junio de 2013). *Ciencia y poder aereo*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2021, de <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106>
- Prager, J., King, K., & Carlson, D. W. (13 de 11 de 2021). *Teach Engineering*. Obtenido de https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_bernoulli_lesson01
- Revista Semestral de la Universidad de Costa rica. (2006). Ingeniería . *EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA* , 16, 138.

- Rivero, M. G. (2010). *DISEÑO DE UN UAV DE PROPULSION ELECTRICA PARA MONITORIZACION AMBIENTAL*. Sevilla: Escuela Superior De Ingenieros.
- RODRÍGUEZ ROMÁN , C. M., HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ , A., & SOTO PALACIOS , J. (31 de Octubre de 2012). *Repositorio Digital Institucional (RDI)*. Recuperado el 3 de Diciembre de 2021, de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/7958>
- S., S. (10 de Octubre de 2017). *3D natives* . Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- S., S. (9 de Noviembre de 2017). *3D natives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- Scott, J. (10 de Octubre de 2004). *Aerospaceweb org*. Obtenido de <http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0197.shtml>
- SDI INDUSTRIAL . (1 de Octubre de 2021). *SDI industrial*. Obtenido de SDI: <https://sdindustrial.com.mx/blog/proceso-de-manufactura/>
- Thomas , S. (01 de Noviembre de 2007). *Brooklyn Center Patente nº 20070251313*.
uavnavigation.com 2022. (10 de Febrero de 2022). *UAV navigation grupo oesía*. Obtenido de UAV navigation grupo oesía Web site: <https://www.uavnavigation.com/es/empresa/blog/que-es-un-imu>
- Zafra , M., & Rambaldi, M. (20 de Junio de 2017). *Descubre por qué algunos aviones no pueden despegar cuando hace demasiado calor*. Obtenido de <https://www.univision.com/noticias/clima/descubre-por-que-los-aviones-no-pueden-volar-cuando-hace-demasiado-calor>
- Zitnik, J. (1999). *Manual de Vuelo Del PIPER . 1*.

8. Anexos

Anexo 1

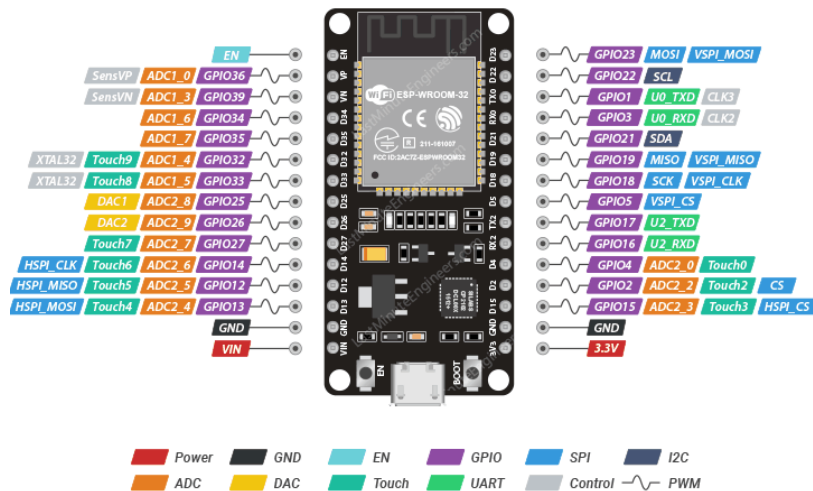
Data sheet motor paso a paso 42SHD0034-20B

HYBRID STEPPING MOTOR		42SHD0034-20B		Casun	
General Specification			Electrical Specification		
Step Angle	1.8°	Rated Voltage	5.0V dc		
Number of Phase	2	Rated Current	1.0A		
Insulation Resistance	100MΩmin. (500V DC)	Resistance per phase	5.0Ω±10%		
Insulation Class	Class B	Inductance per Phase	6.2mH±20%		
Rotor Inertia	38g.cm ²	Holding torque	300mN.m		
Mass	0.2kg	Detent torque	12mN.m		

Figura 8.1. Data sheet motor paso a paso 42SHD0034-20B. (Made-in-China, 2023)

Anexo 2

Esp-32 PinOut



ESP32 Dev. Board Pinout

Last Minute ENGINEERS.com

Figura 8.2. Esp-32 Pinout. (LastMinuteEngineers.com., 2023)

Anexo 3

Giroscopio MPU-9250 datasheet.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s
	FS_SEL=1		±500		°/s
	FS_SEL=2		±1000		°/s
	FS_SEL=3		±2000		°/s
Gyroscope ADC Word Length			16		bits
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C		±3		%
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±4		%
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		±0.1		%
Cross-Axis Sensitivity			±2		%
Initial ZRO Tolerance	25°C		±5		°/s
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±30		°/s
Total RMS Noise	DLPFCFG=2 (92 Hz)		0.1		°/s-rms
Rate Noise Spectral Density			0.01		°/s/√Hz
Gyroscope Mechanical Frequencies		25	27	29	KHz
Low Pass Filter Response	Programmable Range	5		250	Hz
Gyroscope Startup Time	From Sleep mode		35		ms
Output Data Rate	Programmable, Normal mode	4		8000	Hz

Figura 8.3. Giroscopio MPU-9250 datasheet. (All Data Sheet)

Anexo 4

Planos soporte motor paso a paso

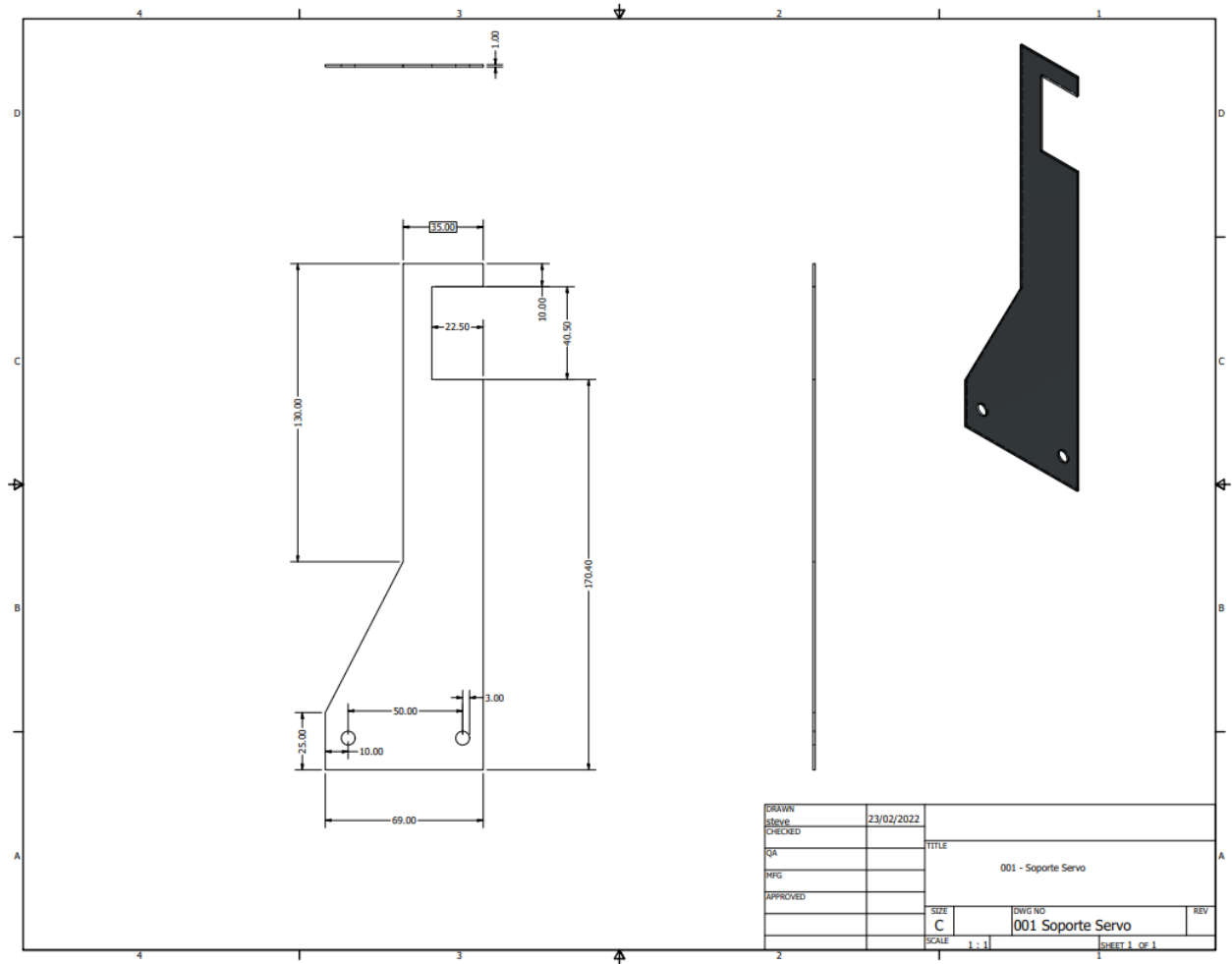


Figura 8.4. Planos soporte servo motor paso a paso. (Autores)

Anexo 5

Plano soporte eje de transmisión

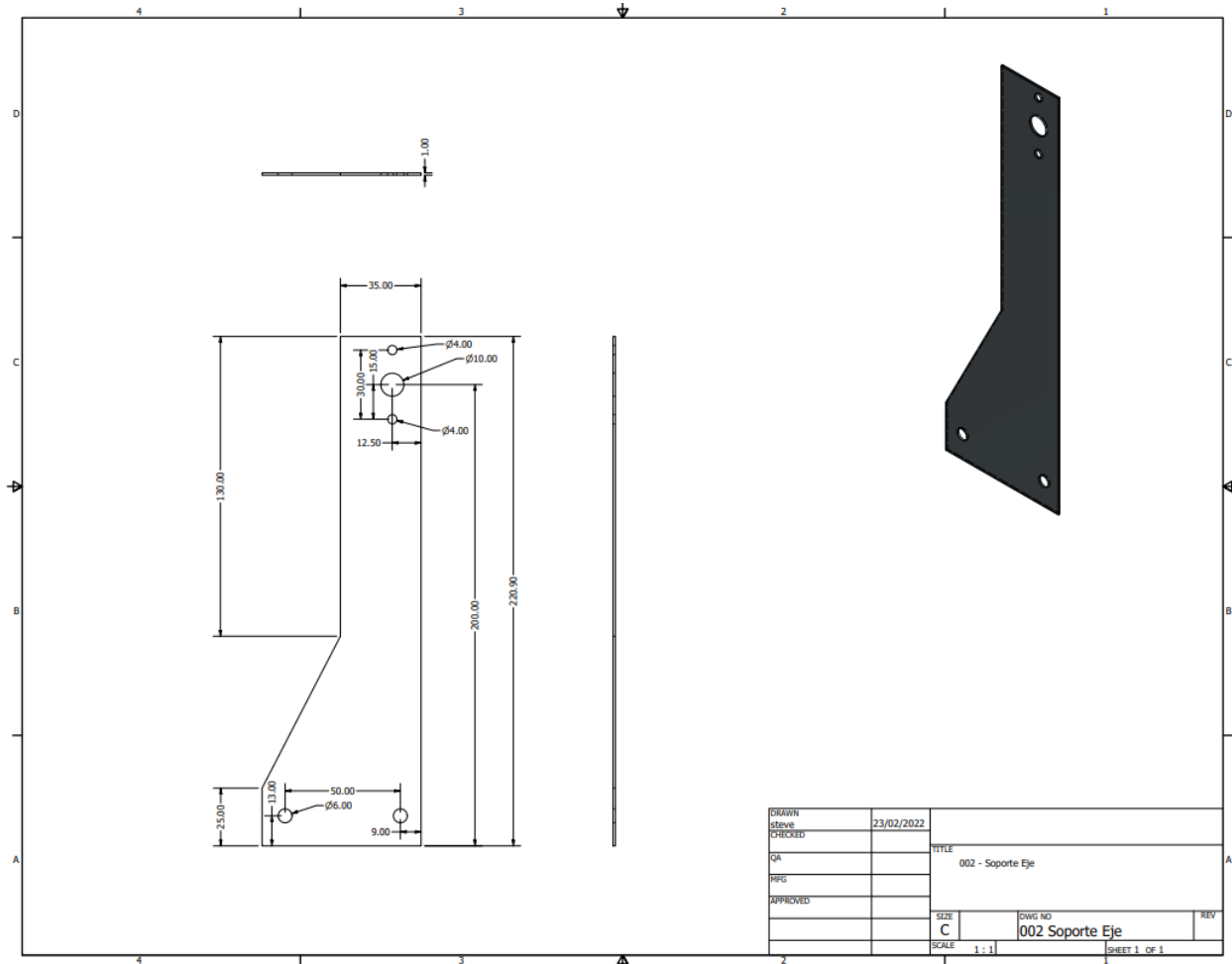


Figura 8.5. Plano soporte eje de transmisión. (Autores)

Anexo 6

Plano soporte del rodamiento

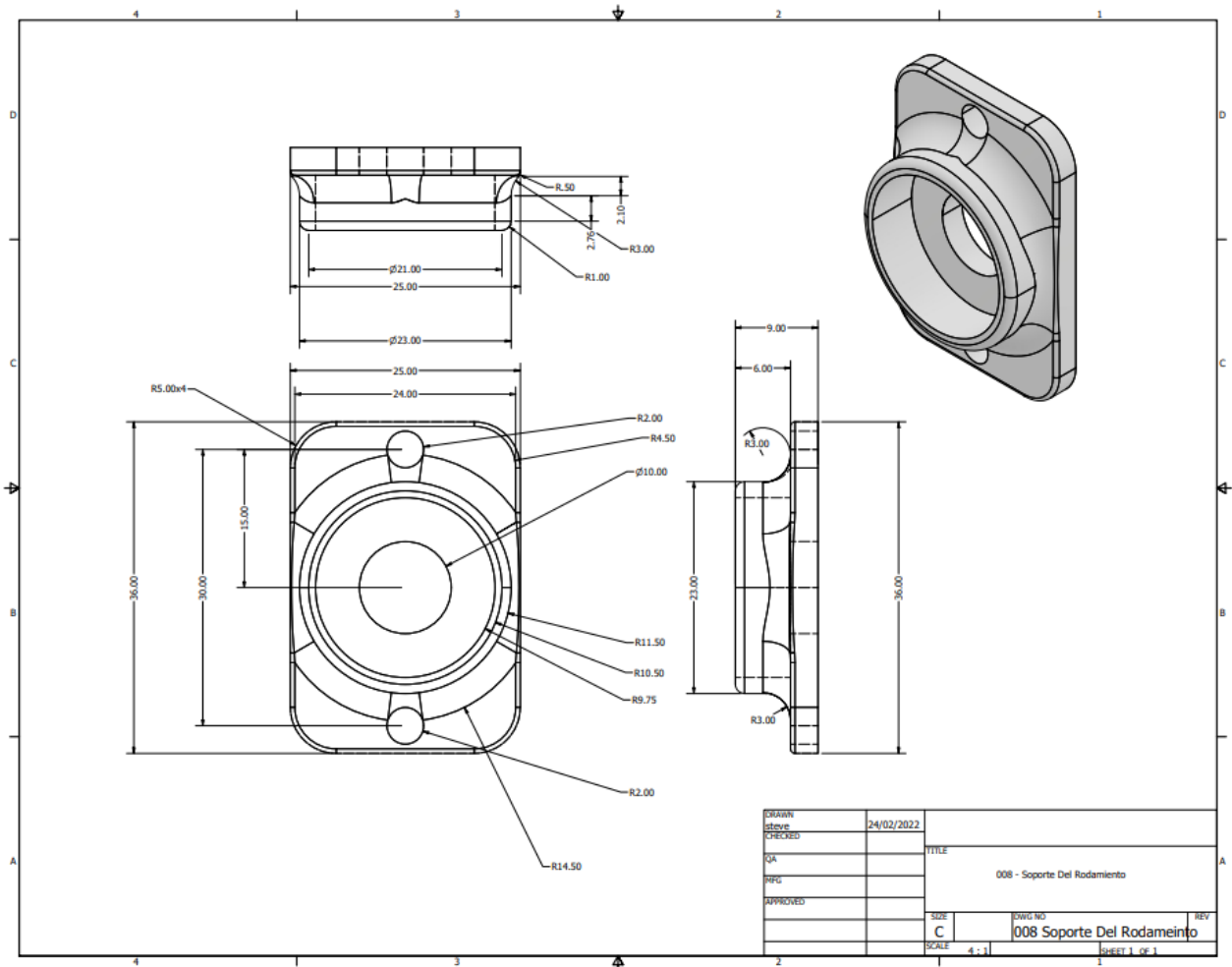


Figura 8.6. Plano soporte del rodamiento. (Autores)

Anexo 7

Planos eje de transmisión

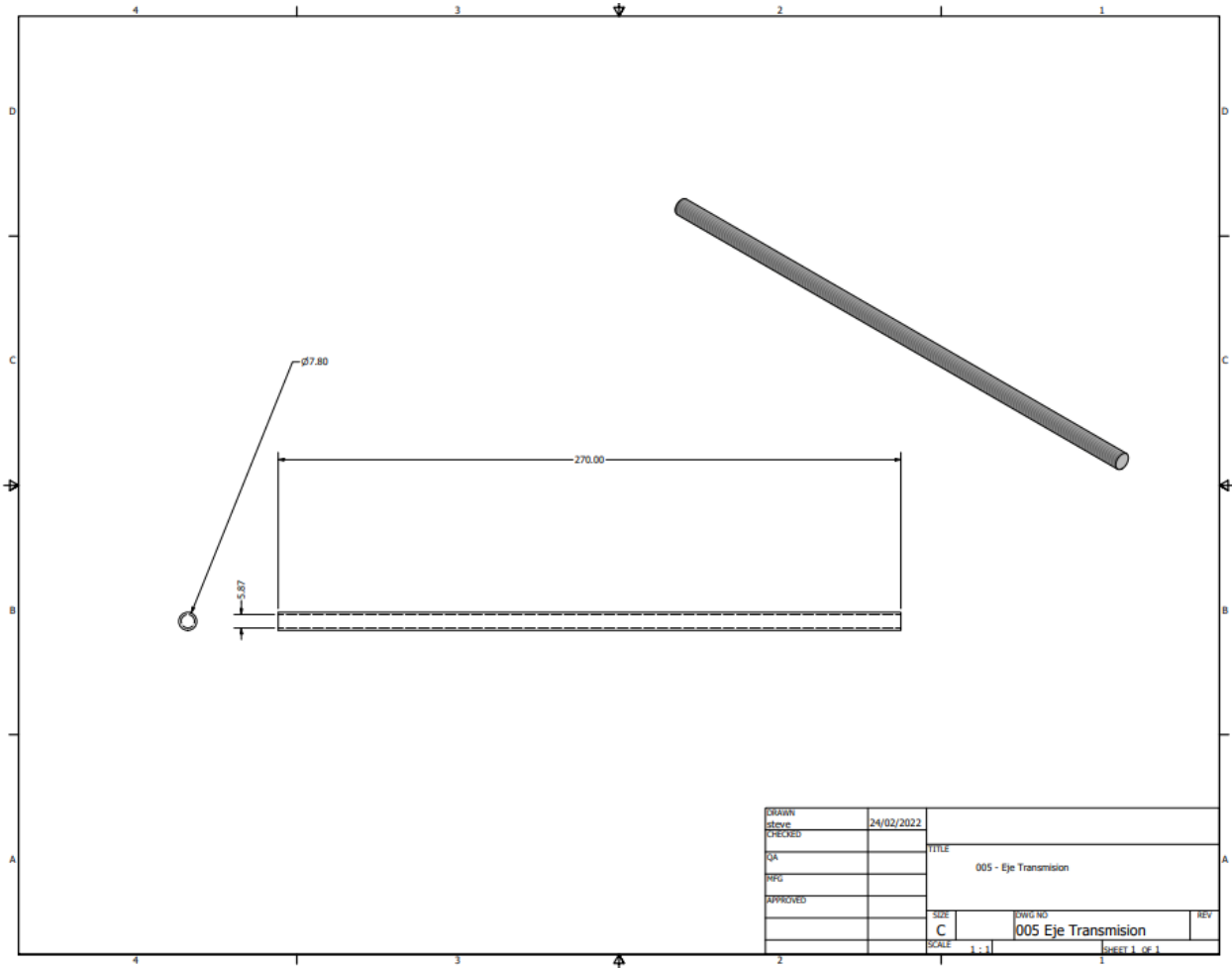


Figura 8.7. Planos eje de transmisión. (Autores)

Anexo 8

Planos del rodamiento

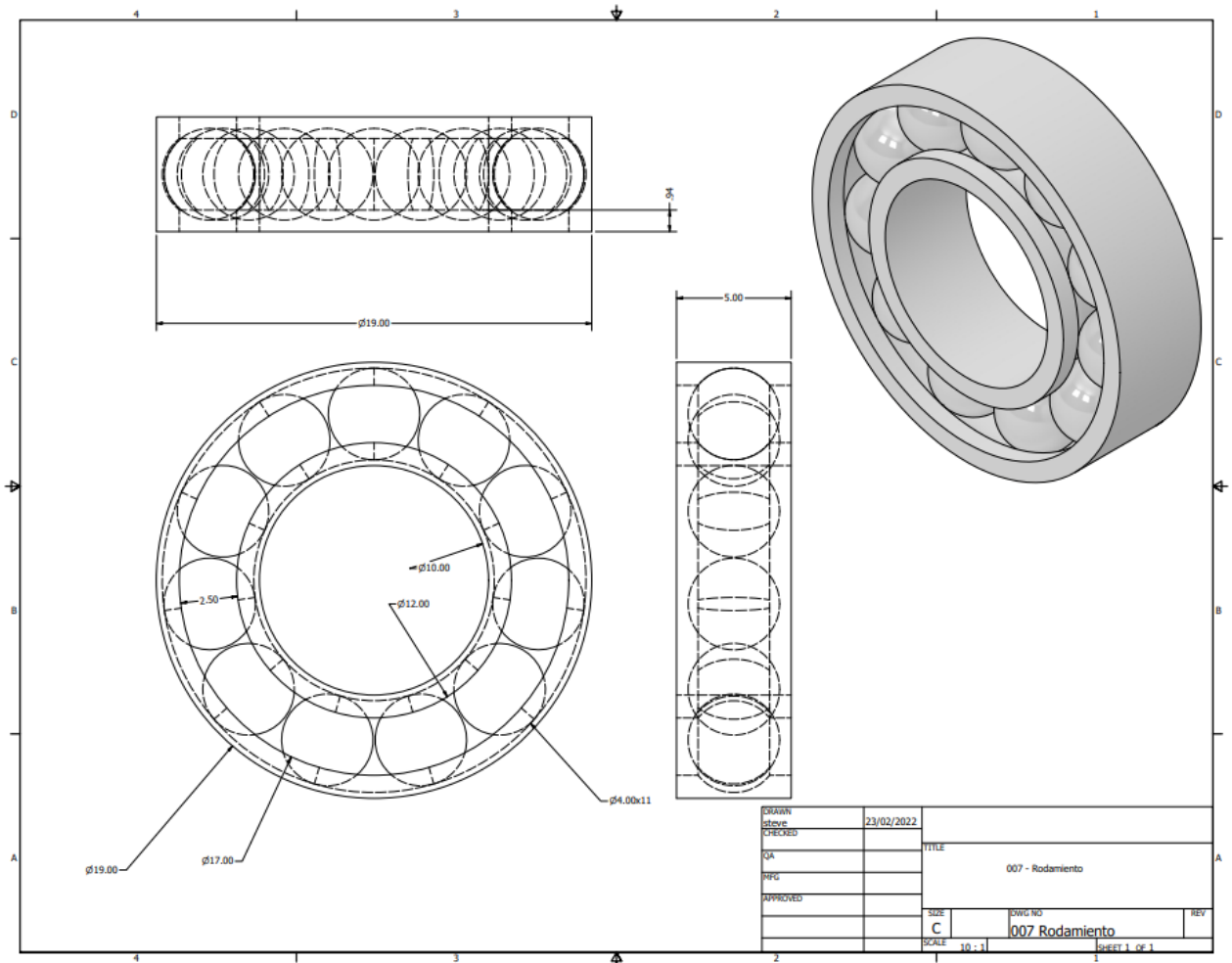


Figura 8.8. Planos del rodamiento. (Autores)

Anexo 9

Planos del acople eje de transmisión con el servo motor

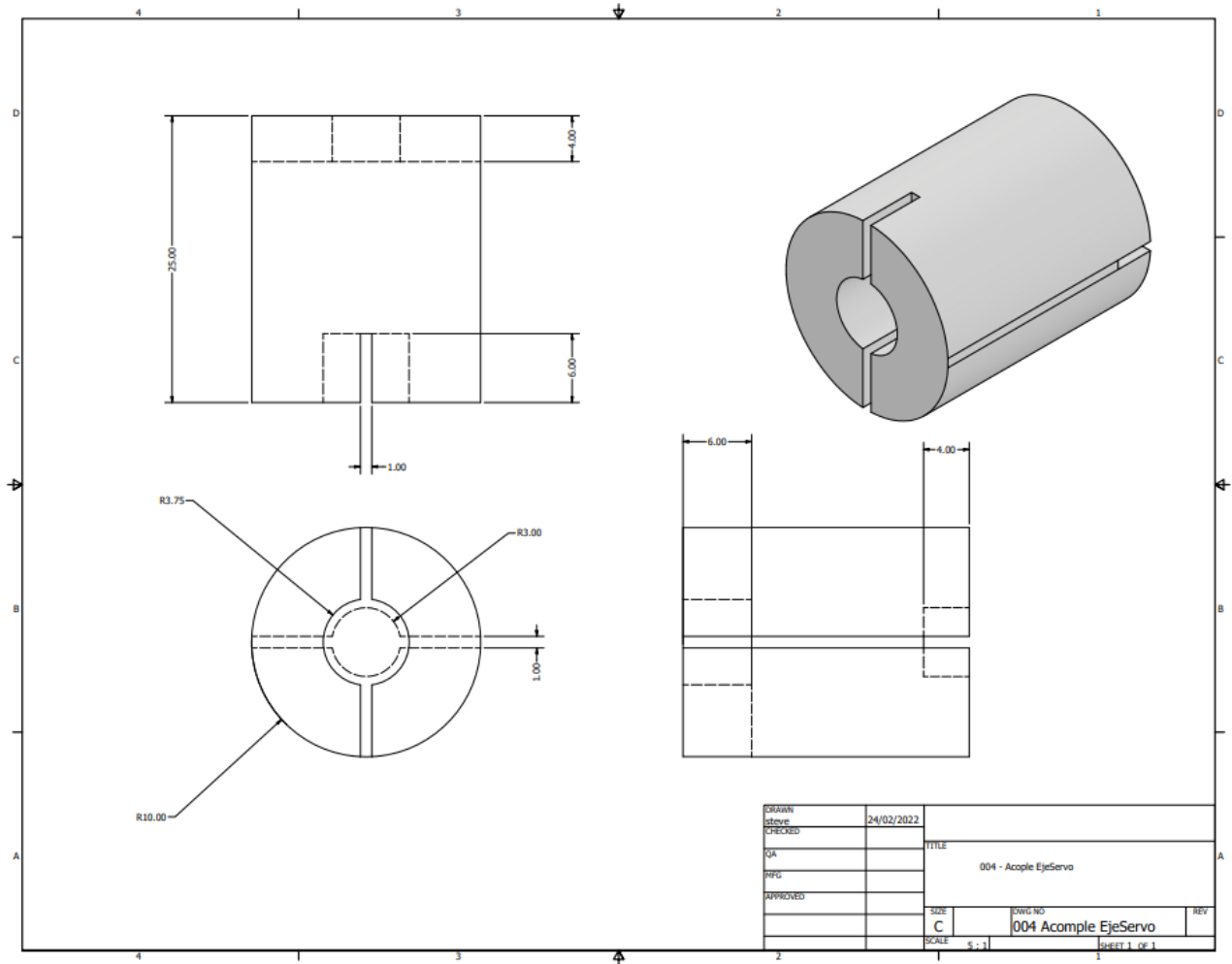


Figura 8.9. Planos del acople eje de transmisión con el servo motor. (Autores)

Anexo 10

DataSheet eje de transmisión

Especificaciones técnicas

Fabricante	Ewead
Peso del producto	9.3 onzas
Dimensiones del paquete	13.31 x 3.98 x 1.77 pulgadas
Is Discontinued By Manufacturer	No
Tamaño	300mm
Color	Plateado
Material	Stainless Steel+Brass

Figura 8.10. DataSheet eje de transmisión. (Autores)

Anexo 11

Planos perfil aerodinámico

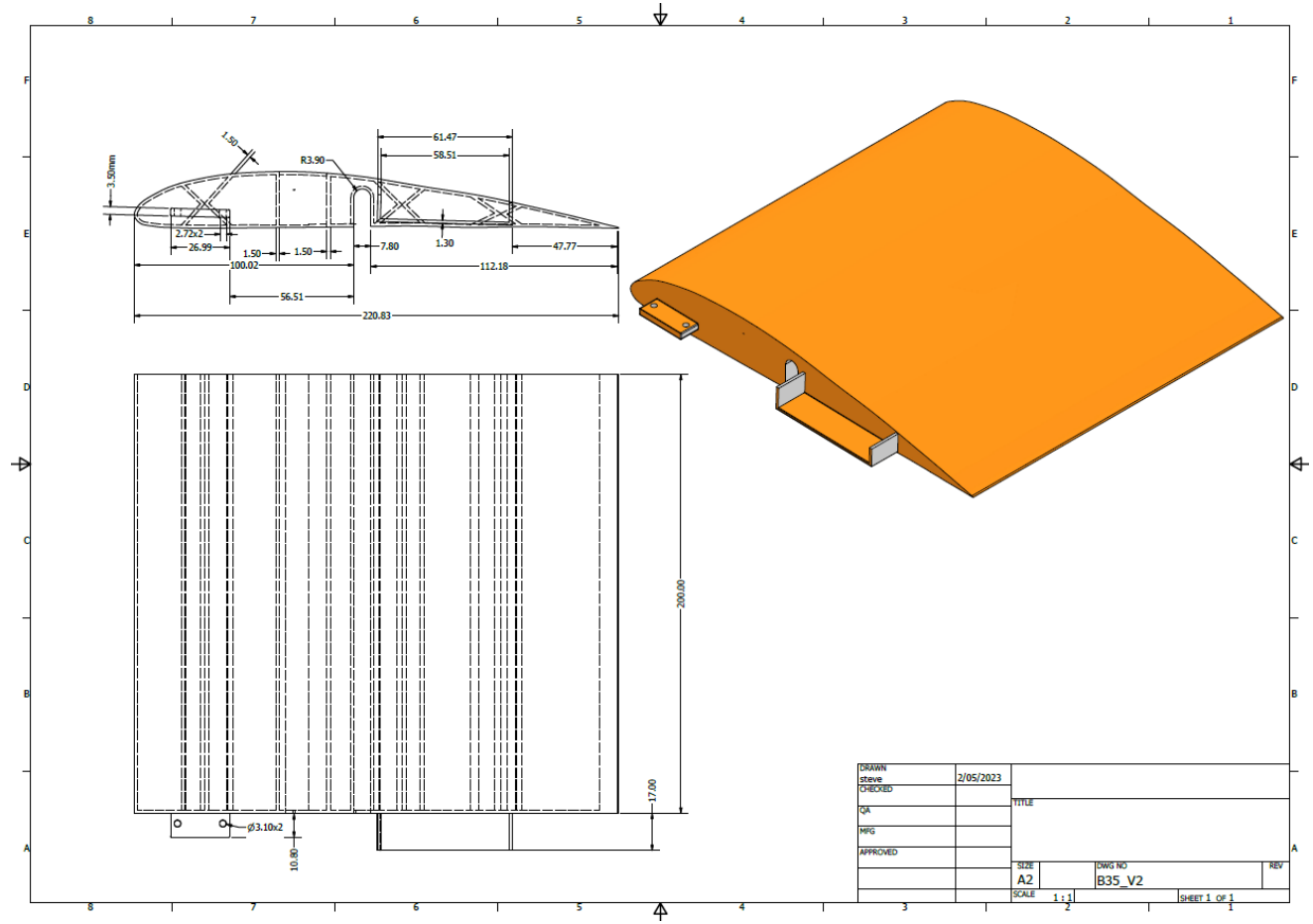


Figura 8.11. Plano perfil aerodinámico. (Autores)

Anexo 12

Plano soporte paso a paso

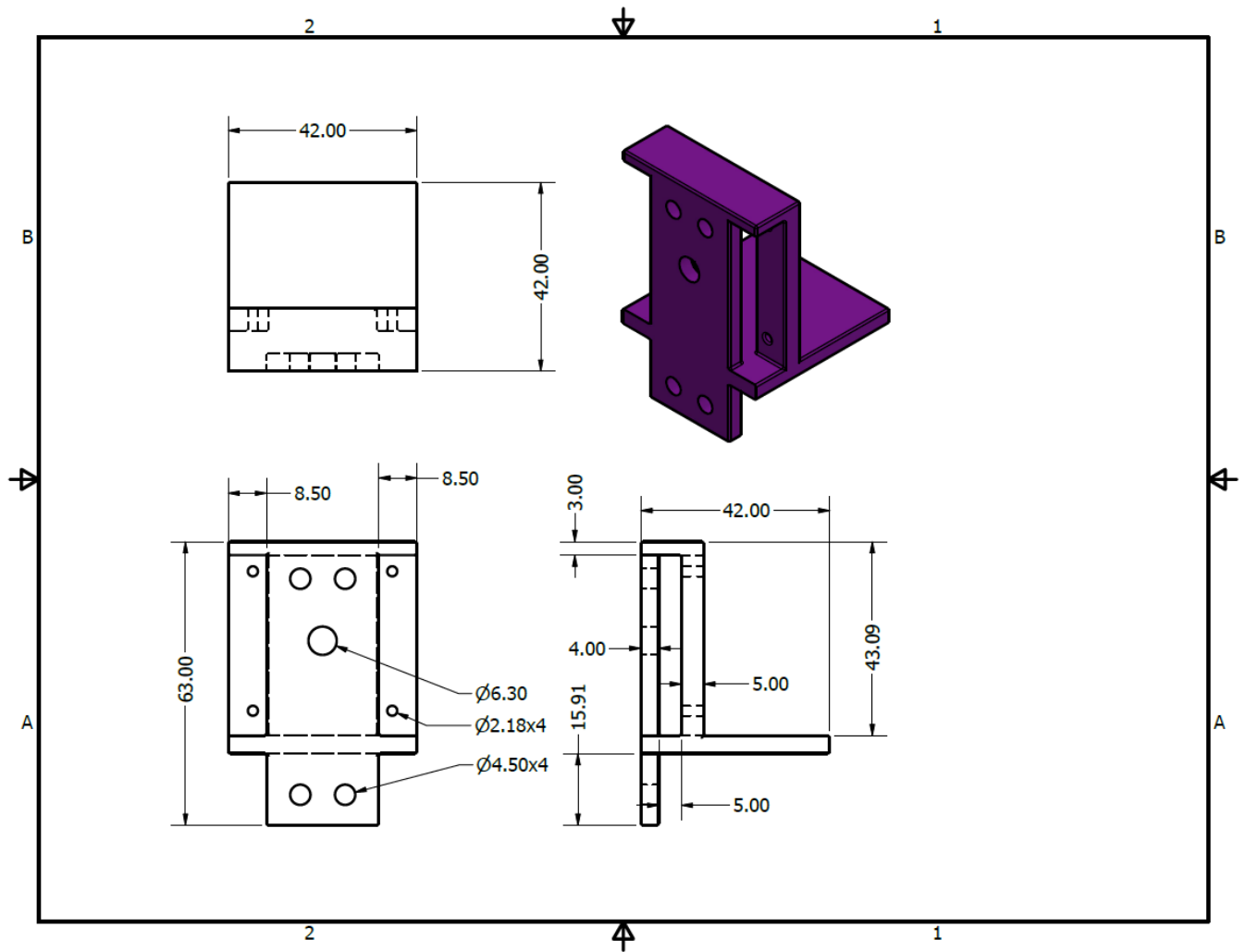


Figura 8.12. Plano soporte paso a paso. (Autores)

Anexo 13

Código Arduino utilizado en el banco de control de ángulo de ataque

```
//Configuraciones acelerometro-Giroscopio
#include <MPU9250_WE.h>
#include <Wire.h>
#define MPU9250_ADDR 0x68
MPU9250_WE myMPU9250 = MPU9250_WE(MPU9250_ADDR);

//Configuraciones para el servo
#define pinEnable 13 //Pin enable low4 = motor enciende--- pin enable high = motor apagado
#define pinStep 12 // pin de step para dar los pasos al servo
#define pinDirection 14// pin Step decide el sentido de giro

//Configuraciones del bluetooth
#include <BluetoothSerial.h>
#if !defined(CONFIG_BT_ENABLED) || !defined(CONFIG_BLUEDROID_ENABLED)
#error Bluetooth is not enabled! Please run `make menuconfig` to and enable it
#endif

//Configuraciones LCD
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);//crear un objeto lcd (DIRECCIÓN pantalla, Tamaño x, Tamño y)

//Configuraciones teclado matricial
#include <Keypad.h>
#define ROW_NUM 4 // four rows
#define COLUMN_NUM 4 // four columns

char keys[ROW_NUM][COLUMN_NUM] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};
byte pin_rows[ROW_NUM] = {15, 4, 16, 17};
byte pin_column[COLUMN_NUM] = {5, 18, 19, 3};

Keypad teclado = Keypad( makeKeymap(keys), pin_rows, pin_column, ROW_NUM, COLUMN_NUM );

char tecla; //Variable para capturar valor del teclado matricial
int posicionLcd = 0; //Variable que posiciona el cursor en la lcd
String num; //Variable que me captura el valor numerico en formato String

//Banderas
boolean bandB=false,teclaOne=false,capturaString=false;
boolean bandMode = false,bandKeypad=false,bandBth=false;

//Variables para logica de los grados
int gradosDeseados,diffGrados,gradosActuales;
```

```

//Variables para motor paso a paso
long paso = 400; // 200 pasos a 1.8 grados todos low --- 400 pasos con el msl high a 0.9 grados
int velocidadMotor = 5000;
long grados;
long equivalenciaPasos;

//Variables bluetooth
byte dataRx;//Dato en el buffer
char arrayChar[5];// almacenamiento del Buffer
int contador;//Contador de arreglo almacenamiento buffer

//Variables giroscopio
float anguloFloat;
BluetoothSerial BT; //Creacion de Objeto Bluetooth

//Funcion para redondear un float
float redondear(float valor, int decimales) {
    double _potencia = 1.0;
    if (decimales != 0) {
        _potencia = 1.0;
        for (int i=0; i<decimales; i++) {
            _potencia *= 10;
        }
    }
    return (roundf(valor * _potencia) / _potencia);
}

//Funcion para el bluetooth
void serialEvent(){
    if (BT.available()){ // Compruebe si recibimos algo de Bluetooth
        dataRx = BT.read(); // Lee lo que recibimos
        arrayChar[contador++] = dataRx;
    }
}

//Funcion para el movimiento del paso a paso
void movimiento(int diffGrados){
    digitalWrite(pinEnable,LOW);// low apaga el ENCIENDE EL MOTOR
    if(diffGrados > 0){
        digitalWrite(pinDirection,HIGH);//Enciende el motor
    }else if (diffGrados < 0 ){
        digitalWrite(pinDirection,LOW);//Enciende el motor
        diffGrados = abs(diffGrados);
    }

    equivalenciaPasos = (diffGrados*paso)/360;
}

```



```

for(int i = 0; i < equivalenciaPasos; i++){
    digitalWrite(pinStep,HIGH);
    delayMicroseconds(velocidadMotor);
    digitalWrite(pinStep,LOW);
    delayMicroseconds(velocidadMotor);
}
digitalWrite(pinEnable,HIGH);// HIGH apaga el APAGA EL MOTOR
}

//Funcion que muestra el menu principal
void menuInicio(){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);//poner el cursor en las coordenadas (x,y)
    lcd.print("A:POS B:NEG");
    lcd.setCursor(0,1);//poner el cursor en las coordenadas (x,y)
    lcd.print("C:ANG 0 D:MENU");
}

//Funcion para retorno al menu inicial
void retornoMenu(){
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("    RETORNO    ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" MENU INICIAL ");
    delay(1000);
    menuInicio();
}

void angulo(){
    xyzFloat angle = myMPU9250.getAngles();
    anguloFloat = angle.y;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin();

    lcd.init();//inicializar la pantalla lcd
    lcd.backlight();//Encender la luz de fondo
    lcd.setCursor(0,0);//poner el cursor en las coordenadas (x,y)
    lcd.print(" BIENVENIDO ");//muestra en la pantalla max 20 caracteres
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" CONTROL AOT ");
    delay(2000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);

```

```

lcd.print("CONFIGURANDO...");
//Configuraciones sistema
//Configuracion inicial de acelerometro y giroscopio

if(!myMPU9250.init()){
  Serial.println("MPU9250 does not respond");
}
else{
  Serial.println("MPU9250 is connected");
}
Serial.println("Position you MPU9250 flat and don't move it - calibrating...");
delay(1000);
myMPU9250.autoOffsets();
Serial.println("Done!");
myMPU9250.setAccRange(MPU9250_ACC_RANGE_2G);
myMPU9250.enableAccDLPF(true);
myMPU9250.setAccDLPF(MPU9250_DLPF_6);

BT.begin("ESP32_AOT"); // Nombre de dispositivo Bluetooth

//Configuracion pines para paso a paso
pinMode(pinEnable, OUTPUT); //Enable
pinMode(pinStep, OUTPUT); //Step
pinMode(pinDirection, OUTPUT); //Direction
digitalWrite(pinEnable,HIGH);// low enciende el motor ---high apaga el motor

//Fin configuraciones
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("A:Modo teclado");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("B:Modo bluetooth");
}

void loop() {

  //Este if verifica el sistema no este en modo bluetooth con el fin de trabajar con el teclado
  if(bandBth==false)tecla = teclado.getKey();//Reconocimiento de tecla

  //Este if es el que me decide el modo de trabajo(teclaod o bluetooth)
  if(tecla && (bandMode == false)){
    switch(tecla){
      case('A'):
        bandKeypad=true;
        bandMode= true;
        tecla = ' ';//Esta asignacion se hace con el fin de no arrastrar el valor de tecla hacia el siguiente if
        lcd.clear();

```

```

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" Modo teclado ");
    delay(2000);
    break;
case('B'):
    bandBth=true;
    bandMode=true;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(" Modo bluetooth ");
    break;
default:
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Modo no valido");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Seleccione A o B");
    delay(2000);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("A:Modo bluetooth");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("B:Modo teclado");
    break;
}
}

//Condicionales para el trabajo con el teclado
if(tecla && (bandMode == true) && (bandKeypad == true)){ //verificacion de modo seleccionado y modo keypad activas
if((tecla == 'A' || tecla == 'B' || tecla == 'C') && capturaString == false){ //Seleccion de opcion
switch(tecla){

    case('A'):
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Ang + de valor:");
        capturaString=true;
        break;

    case('B'):
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Ang - de valor:");
        bandB=true;
        capturaString=true;
        break;
}
}
}

```

```

case('C'):
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Volviendo a 0...");
  angulo();
  float redondeo = redondear(anguloFloat,0);
  int anguloInt = int(redondeo);
  diffGrados=0-anguloInt;
  movimiento(diffGrados);
  gradosActuales=0;
  delay(2000);
  retornoMenu();
  Serial.print("Volviendo a 0");
  Serial.print(redondeo);
  Serial.print(anguloInt);
  Serial.print(anguloFloat);
  break;
}

teclaOne= true;//Esto es para que no ingrese valores diferentes a los señalados en el menu inicial
} else if (tecla == ' '){ //Esta condicion activa la funcion de menu de inicio cuando se elige el modo de operacion
  menuInicio();
} else if (tecla == '#') { //Con esta condicion se puede observar el valor del angulo actual y el giroscopio
  angulo();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Gir en: "); //Falta agregar el valor del giroscopio
  lcd.setCursor(8,0);
  lcd.print(anguloFloat);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Ang en: ");
  lcd.setCursor(8,1);
  lcd.print(gradosActuales);
} else if (teclaOne == false) { //Con esta funcion se verifica que se oprima una de las teclas deseadas en el menu inicial
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Tecla no valida");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Seleccione de: ");
  delay(2000);
  menuInicio();
} else if (tecla == 'D') { //Retorno menu inicial
  retornoMenu();
  teclaOne=false;
  num = "";
} else if (tecla == '\n') { //Enter
  gradosDeseados = num.toInt();

```

```

-
if((gradosDeseados > 0) && (gradosDeseados <= 360)) {
    if (bandB== true){
        gradosDeseados = gradosDeseados *-1;
        bandB=false;
    }

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Angulo actual: ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(gradosDeseados);
    diffGrados=gradosDeseados-gradosActuales;

    movimiento(diffGrados);
    gradosActuales=gradosDeseados;
    posicionLcd = 0;
    capturaString=false;
} else{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Angulo no valido");
    delay(1000);
    retornoMenu();
    teclaOne=false;
    posicionLcd = 0;
    capturaString= false;
    num = "";
}
} else if(capturaString == true){//captura del valor numerico
    if(((tecla !='A') && (tecla !='B')&& (tecla !='C')) && posicionLcd < 3 ){
        lcd.setCursor(posicionLcd++,1);
        lcd.print(tecla);
        num += tecla;
    } else{
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Tecla no valida");
        delay(1000);
        retornoMenu();
        teclaOne=false;
        posicionLcd = 0;
        capturaString= false;
        num = "";
    }
}
}
}
}

```

```

        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Tecla no valida");
        delay(1000);
        retornoMenu();
        teclaOne=false;
        posicionLcd = 0;
        capturaString= false;
        num = "";
    }
}

if(bandBth == true && bandMode == true){
    serialEvent();
    angulo();
    BT.printf("%g%3.3f",anguloFloat);
    Serial.printf("%g%3.3f",anguloFloat);
    if(dataRx=='#'){
        for(int i=0; i<(contador-1); i++){
            num+=arrayChar[i];
        }
        Serial.println("String entero");
        Serial.println(num.toInt());
        gradosDeseados =num.toInt();

        if((gradosDeseados > -180)&&(gradosDeseados <= 360)&&(gradosDeseados != 0)){
            diffGrados=gradosDeseados-gradosActuales;
            movimiento(diffGrados);
            gradosActuales=gradosDeseados;
            Serial.write(gradosDeseados);
            BT.println("*aValor valido*");
            delay(1000);
        } else if (gradosDeseados == 0){
            BT.println("*aEsperando...*");
        } else {
            BT.println("*aValor NO valido*");
            delay(1000);
        }
        contador=0;
        num=" ";
    }
    if(dataRx=='R'){
        BT.println("*aAngulo 0");
    }
    delay(500);
}
}

```

Figura 8.13. Algoritmo de control Arduino. (Autores)