



Universidad de Oviedo

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**Desarrollo de una balanza aerodinámica
para la medida de la fuerza de arrastre en
las sesiones de laboratorio de la
asignatura mecánica de fluidos**

ÁREA DE MECÁNICA DE FLUIDOS

Autora: Dña. Dana Rodríguez García

Tutores: Dña. Mónica Galdo Vega
D. Raúl Barrio Perotti

Fecha: julio 2024





ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1.- Motivación.....	12
1.2.- Objetivos y metodología.....	13
1.3.- Estructura de la memoria.....	14
2. BALANZAS AERODINÁMICAS.....	17
2.1.- Tipos de balanzas.....	18
2.1.1.- <i>Balanzas externas</i>	18
2.1.2.- <i>Balanzas internas</i>	22
2.2.- Principio de funcionamiento.....	22
2.3.- Aplicaciones.....	23
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	25
3.1.- Características generales del flujo externo.....	25
3.2.- Conceptos de arrastre y sustentación.....	26
3.3.- Números adimensionales.....	28
3.4.- Capa límite.....	31
3.4.1.- <i>Capa límite turbulenta</i>	33
3.4.2.- <i>Efectos del gradiente de presión</i>	35
3.5.- Parámetros que influyen en el valor del coeficiente de arrastre...35	
3.5.1.- <i>Forma del objeto</i>	35
3.5.2.- <i>Número de Reynolds</i>	37
3.5.3.- <i>Efectos de compresibilidad</i>	39
3.5.4.- <i>Rugosidad superficial del objeto</i>	41
3.5.5.- <i>Composición del cuerpo</i>	42



4.	ANÁLISIS DE LA BALANZA EXISTENTE	43
5.	TÚNELES DE VIENTO	45
5.1.-	Descripción general	45
5.2.-	Tipos de túneles de viento	46
6.	ELECTRÓNICA Y SOFTWARE	48
6.1.-	Tarjeta Arduino.....	48
6.2.-	Entorno de desarrollo integrado (IDE).....	50
6.3.-	Lenguaje Python	51
7.	METODOLOGÍA DE TRABAJO	53
7.1.-	Descripción del túnel de viento	54
7.2.-	Instrumentación básica del túnel de viento	55
7.2.1.-	<i>Manómetro en la cámara de remanso</i>	<i>55</i>
7.2.2.-	<i>Balanza aerodinámica</i>	<i>56</i>
7.3.-	Condiciones del flujo para las diferentes geometrías de ensayo .	59
7.3.1.-	<i>Número de Mach</i>	<i>59</i>
7.3.2.-	<i>Número de Reynolds</i>	<i>59</i>
7.3.3.-	<i>Esfera</i>	<i>60</i>
7.3.4.-	<i>Disco.....</i>	<i>61</i>
7.3.5.-	<i>Justificación del diseño.....</i>	<i>63</i>
7.3.6.-	<i>Justificación de la modificación en los apoyos de la galga extensiométrica.....</i>	<i>65</i>
7.4.-	Diseño de la balanza.....	68
7.4.1.-	<i>Especificaciones técnicas.....</i>	<i>69</i>
7.4.2.-	<i>Diseño de los componentes individuales.....</i>	<i>70</i>



7.5.-	Fabricación de la balanza	73
7.5.1.-	<i>Procesos de fabricación</i>	73
7.5.2.-	<i>Ensamblaje de los componentes</i>	78
7.6.-	Diseño del gemelo digital	79
7.7.-	Diseño del sistema de adquisición de datos	81
7.7.1.-	<i>Conexión del circuito electrónico</i>	82
7.7.2.-	<i>Programación de la placa Arduino</i>	83
7.7.3.-	<i>Amplificador HX-711</i>	86
7.7.4.-	<i>Célula de carga</i>	86
7.8.-	Diseño de la placa de circuito impreso.....	87
8.	RESULTADOS	90
8.1.-	Calibración	90
8.2.-	Ensayos experimentales.....	97
8.1.-	Rangos de medición de la balanza	101
9.	INCERTIDUMBRE EXPERIMENTAL	105
9.1.-	Fuentes de incertidumbre	106
9.2.-	Evaluación de la incertidumbre	107
9.3.-	Incertidumbre de los componentes electrónicos	108
9.4.-	Incertidumbre de una medición.....	109
9.5.-	Combinación de incertidumbres.....	110
9.6.-	Propagación de resultados	110
9.6.1.-	<i>Incertidumbre de cada componente</i>	112
10.	PLANIFICACIÓN TEMPORAL	114



11. PRESUPUESTO	116
11.1.- Costes directos	116
11.1.1.- <i>Costes de fabricación</i>	117
11.1.2.- <i>Costes de los componentes electrónicos</i>	120
11.1.3.- <i>Costes de los ensayos experimentales</i>	121
11.2.- Costes indirectos.....	122
11.3.- Resumen del presupuesto	122
12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	123
12.1.- Conclusiones.....	123
12.2.- Trabajos futuros	125
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
14. ANEXOS.....	129
14.1.- Código Arduino	130
14.2.- Código gemelo digital.....	134
14.3.- Esquema de diseño de la PCB	139
14.4.- Planos	140



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balanza externa (Aguirre, Astiz, Ferrandez, & Meroniuc, 2016)....	19
Figura 2. Galga extensiométrica contenida en una célula de carga	23
Figura 3. Clasificación del flujo (a) bidimensional; (b) axisimétrico; (c) tridimensional.....	26
Figura 4. Esfuerzos generados sobre un cuerpo bidimensional por el fluido que los rodea. (a) Distribución de presiones; (b) Distribución de cortantes; (c) Fuerza resultante (sustentación y arrastre).....	27
Figura 5. Esfuerzos cortantes y de presión sobre la superficie de un pequeño elemento de un cuerpo (Young, Munson, & Okiishi, 2001)	28
Figura 6. comparación del flujo alrededor de una placa plana: (a) flujo laminar a bajos números de Reynolds; (b) flujo a altos número de Reynolds (White, 2004)	32
Figura 7. Interacción entre las regiones viscosa y no viscosa en la parte posterior del flujo alrededor de un cuerpo romo: (a) flujo ideal; (b) flujo real (White, 2004).....	33
Figura 8. Coeficiente de resistencia por fricción para una placa plana paralela al flujo ascendente (Young, Munson, & Okiishi, 2001).....	34
Figura 9. Coeficiente de arrastre para una elipse con la zona característica ya sea de zona frontal $A=$ o el área en planta $A= l \cdot D$ (Young, Munson, & Okiishi, 2001)	36
Figura 10. Caracterización del coeficiente de resistencia aerodinámica en función del número de Reynolds para objetos diversos grados aerodinámicos (Young, Munson, & Okiishi, 2001).....	38
Figura 11. Coeficientes de arrastre de cuerpos lisos a bajos números de Mach para el caso de cuerpos tridimensionales (White, 2004).....	40
Figura 12. Efecto de la rugosidad superficial en el coeficiente de arrastre de una esfera en función del número de Reynolds (Young, Munson, & Okiishi, 2001).	41
Figura 13. Balanza aerodinámica existente	44
Figura 14. Placa de Arduino (R4)	49



Figura 15. Esquema de la metodología de trabajo	54
Figura 16. Esquema del túnel de viento de los ensayos experimentales (GPMF, 2024)	55
Figura 17. Línea de flujo entre la cámara de remanso (1) y la tobera (2) (GPMF, 2024)	55
Figura 18. Esquema simplificado de la instalación de la balanza aerodinámica	58
Figura 19. Longitud característica de la esfera modelada en Inventor	61
Figura 20. Disco modelado en Inventor	62
Figura 21. Apoyos fijos iniciales.....	67
Figura 22. Modelización del ensamblaje modificado	68
Figura 23. Esquema de colocación de la balanza aerodinámica en el túnel de viento	70
Figura 24. Ensamblaje de la balanza en Inventor.....	72
Figura 25. Vistas con posiciones del ensamblaje de la balanza.....	77
Figura 26. Gemelo digital de la balanza aerodinámica.....	80
Figura 27. Esquema de conexión del circuito electrónico.....	85
Figura 28. Placa de circuito impreso (PCB).....	88
Figura 29. Placa de circuito impreso conectada a la placa Arduino.....	89
Figura 30. Mecanismo de calibración de la balanza.....	91
Figura 31. Mecanismo de polea para la calibración de la balanza.	93
Figura 32. Vista general del modelo mecanismo de calibración.....	94
Figura 33. Calibración con el peso de 100 g	96
Figura 34. Calibración de la balanza con el peso de 1000 g	97
Figura 35. Efecto de la rugosidad superficial en el coeficiente de arrastre de una esfera en función del número de Reynolds (Young, Munson, & Okiishi, 2001)	98
Figura 36. Modelización en Inventor del ensayo de la balanza aerodinámica con las diferentes geometrías: esfera y disco	100
Figura 37. Coeficientes de arrastre de la geometría esférica en función del número de Reynolds	101



Figura 38. Coeficientes de arrastre de la geometría de disco en función del número de Reynolds.....	103
Figura 39. Planificación temporal del proyecto	115
Figura 40. Código del sistema de adquisición en Arduino	133
Figura 41. Código del gemelo digital en Python	138
Figura 42. Esquema de diseño de la PCB.....	139



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rango de valores del número de Reynolds para las diferentes geometrías	63
Tabla 2. Componentes del circuito electrónico y su función	82
Tabla 3. Características técnicas del equipo informático empleado.	116
Tabla 4. Coste de fabricación de los componentes mecánicos de la balanza aerodinámica.....	119
Tabla 5. Coste de adquisición de los componentes electrónicos y la mano de obra asociada.....	121
Tabla 6. Resumen del presupuesto.....	122



1. INTRODUCCIÓN

La medición de la fuerza de arrastre en el contexto de la aerodinámica es fundamental para la comprensión y análisis del comportamiento de objetos en movimiento a través de un medio fluido. La evaluación de la fuerza de arrastre es crucial en numerosas aplicaciones prácticas que van desde el diseño de vehículos aerodinámicos hasta la optimización de procesos industriales.

Una de las partes más importantes de una campaña de ensayos en túnel de viento es la medición de cargas aerodinámicas a través de una balanza. En las aplicaciones aeronáuticas, la medición de las cargas aerodinámicas en un túnel de viento, fuerzas y momentos es una tarea muy difícil debido a la precisión requerida. Las balanzas de túnel de viento, compuestas por varios componentes de hardware y software, proporcionan directamente, con gran precisión y fiabilidad, las mediciones de interés. Debido a esto, las balanzas de túnel de viento se han convertido en una herramienta habitual en las instalaciones de ensayo.

El número de componentes de medición y la posición de la balanza en relación con el modelo y la cámara del túnel aerodinámico determinan los diseños de las balanzas de túnel aerodinámico. Las más flexibles, en términos de usabilidad, son las balanzas externas de seis componentes, por lo que se hará referencia a ellas para introducir el proceso de calibración, que es uno de los puntos clave para conseguir la precisión y fiabilidad requeridas en los resultados de los ensayos aerodinámicos. Debido a su influencia en la precisión de la medición de la resistencia aerodinámica, también se analiza en profundidad el efecto de acoplamiento entre las mediciones de sustentación y resistencia aerodinámica. El análisis de los efectos no estacionarios se realiza finalmente teniendo en cuenta los requisitos y limitaciones de la balanza del túnel de viento, con especial atención a una cuestión que no se menciona habitualmente: las fuerzas de inercia generadas en la balanza por las vibraciones del modelo y su influencia en las fuerzas aerodinámicas que deben medirse. Se hacen varias menciones al procesamiento y adquisición de señales, ya que éste es el otro punto clave en la precisión de las mediciones. Es fácil extrapolar estos procedimientos a otros tipos de balanzas, ya



que la intención principal es mostrar los puntos críticos que hacen de las balanzas de túnel de viento un hardware tan especial y complejo. (González, Ezquerro, Lapuerta, Laverón, & Rodríguez, 2011)

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster se centra en el desarrollo de una balanza aerodinámica dedicada a la medición precisa y confiable de la fuerza de arrastre en las prácticas de laboratorio de la asignatura de mecánica de fluidos. Esta balanza no solo proporcionará una herramienta experimental para enriquecer la experiencia práctica de los estudiantes, sino que también servirá como una plataforma de investigación para explorar fenómenos fluidomecánicos en un entorno controlado.

1.1.- Motivación

El Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Oviedo cuenta en la actualidad con una balanza aerodinámica capaz de medir el arrastre sobre cuerpos sumergidos en fluidos. Esta balanza se acopla a un túnel de viento y se utiliza en las prácticas de laboratorio de la asignatura “Mecánica de Fluidos”. La balanza consta de una célula de carga y de un sistema simple de adquisición que permite medir la fuerza media de arrastre. Las balanzas aerodinámicas deben cumplir unos requisitos, entre los que se encuentran: alta sensibilidad, linealidad y repetitividad, baja interacción entre los componentes y baja histéresis.

Para mejorar las medidas de la fuerza de arrastre, en este proyecto se plantea el diseño y montaje de una nueva balanza aerodinámica que mejore las prestaciones de la ya disponible. En concreto, se quieren mejorar las conexiones entre el objeto a medir y la balanza para que haya un menor desplazamiento relativo entre las diferentes partes de la misma. Además, se necesita aumentar las propiedades elásticas y la resistencia a la fatiga de los elementos de la balanza utilizando elementos de acero aleado para disminuir la histéresis. Por último, también se desea poder actuar sobre el sistema de adquisición para realizar una calibración sencilla de la balanza desde el propio sistema.



1.2.- Objetivos y metodología

El objetivo final de este trabajo es el de evaluar el coeficiente de arrastre en diferentes modelos con la balanza aerodinámica fabricada, determinando sus rangos de medición al variar los parámetros de funcionamiento del túnel de viento.

Como objetivos específicos se proponen los siguientes:

- Diseño de la balanza con unas proporciones geométricas que se ajusten al túnel de viento donde luego se colocará para realizar los ensayos experimentales.
- Realización de la geometría 3D mediante herramientas de dibujo asistido por Computador (CAD).
- Extracción de los planos de conjunto y despiece.
- Fabricación de los diferentes componentes mediante mecanizado.
- Obtención y familiarización con los componentes electrónicos que van a permitir obtener los valores numéricos de los ensayos experimentales.
- Creación de un gemelo digital.
- Conexión físico y programación del entorno Arduino.
- Diseño y aplicación del método de calibración de la balanza aerodinámica.
- Realización de los ensayos experimentales con las diferentes geometrías.
- Diseño y fabricación de una placa de circuito integrado.
- Diseño y fabricación de la caja que alberga todos los componentes electrónicos.
- Post-procesado de los resultados, determinando a través de la bibliografía la calidad de las medidas con la balanza aerodinámica actual en comparativa con las recogidas con la balanza aerodinámica existente.

Para realizar el presente Trabajo Fin de Máster y cumplir con los objetivos propuestos se utilizará la siguiente metodología: en primer lugar, se analizará la balanza existente buscando los puntos débiles que deberían ser mejorados. En segundo lugar, se realizará el diseño de la nueva balanza para que se adapte al túnel de viento del área de Mecánica de Fluidos. En tercer lugar, se construirá la



balanza y se implementarán los programas de adquisición. Por último, se realizarán las pruebas finales de la balanza mediante una serie de medidas en objetos de formas sencillas y una comparación de las mismas con los datos que se encuentran en la bibliografía disponible sobre el tema.

1.3.- Estructura de la memoria

La presente memoria se estructurará en los siguientes capítulos:

En el capítulo 2 se ofrece una breve descripción del concepto de balanza aerodinámica. También se comentan los tipos de balanzas existentes, su principio de funcionamiento y sus principales aplicaciones.

En el capítulo 3 se presentan los conceptos teóricos relacionados con la aerodinámica. Estos fundamentos son necesarios para comprender los factores clave de diseño del sistema y los resultados obtenidos de los ensayos experimentales.

En el capítulo 4 se analiza la balanza aerodinámica actual utilizada por el Área de Mecánica de Fluidos, que mide el arrastre sobre cuerpos sumergidos en fluidos. El presente proyecto propone el diseño y montaje de una nueva balanza aerodinámica que mejore las prestaciones de la actual.

En el capítulo 5 se define el concepto de túnel de viento y se justifica su utilización. Además, se describen los diferentes tipos de túneles de viento existentes.

En el capítulo 6 se comentan brevemente los aspectos relacionados con la electrónica y el software del sistema de adquisición de los datos. También se describen los principales programas utilizados para el diseño del sistema de adquisición y para el diseño del gemelo digital.



En el capítulo 7 se explica con detalle la metodología de trabajo que se llevó a cabo. En este apartado se describen las características principales del túnel de viento y la instrumentación básica utilizada. Se detalla el cálculo de las condiciones de flujo para las diferentes geometrías de ensayo. Una vez hecho esto, se explica el proceso de creación de la balanza aerodinámica, desde su diseño hasta la fabricación y ensamblaje de sus componentes. Posteriormente se describe el diseño del gemelo digital que sirve como punto de partida para el posterior conexionado físico de los componentes electrónicos. Por último, se describe el sistema de adquisición, es decir, el circuito electrónico y sus componentes. Además, se comenta el diseño de la placa de circuito impreso (PCB), creada para conseguir un sistema más ordenado y compacto tras realizar todas las pruebas con los componentes electrónicos.

En el capítulo 8 se presentan todos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos experimentales. En este punto se comentan los mecanismos de calibración diseñados y su implementación. Por otro lado, se describen los ensayos experimentales con diferentes geometrías y estos se comparan con la bibliografía existente para evaluar la calidad de las mediciones. Para ello fue necesario digitalizar las gráficas mediante la creación de un código en AutoCAD, determinando así los rangos de medición de la balanza.

En el capítulo 9 se calcula la incertidumbre experimental y su propagación.

En el capítulo 10 se expone la planificación temporal realizada para concluir el proyecto a tiempo y con éxito.

En el capítulo 11 se presenta un presupuesto aproximado para la balanza aerodinámica, incluyendo el coste de mecanizado del acero inoxidable, componentes electrónicos y mano de obra principalmente.

En el capítulo 12 se exponen las principales conclusiones del proyecto. Por otro lado, se sugieren trabajos futuros relacionados principalmente con el desarrollo del gemelo digital.



En el capítulo 13 se enumeran todas las referencias bibliográficas utilizadas para la redacción del documento, así como para el diseño y la creación de las diferentes partes de la balanza aerodinámica y su sistema de adquisición de datos.

Finalmente, en el capítulo 14 se encuentran los anexos. En ellos se incluyen todos los planos de conjunto y despiece de los componentes de la balanza realizados para su fabricación. Por otro lado, se añaden los códigos del sistema de adquisición en Arduino y del gemelo digital. Además, se incluye un esquema de la placa PCB.



2. BALANZAS AERODINÁMICAS

Una balanza aerodinámica es un instrumento que se ocupa de cuantificar las cargas aerodinámicas, fuerzas y momentos, que son ejercidos sobre un objeto cuando incide sobre él una corriente de aire a una velocidad determinada. Este tipo de balanzas se diferencian de las convencionales en que pueden medir fuerzas a priori en direcciones desconocidas, estableciendo los momentos que se generan sobre el cuerpo.

La unidad básica de las balanzas lo compone una célula de carga que puede aislar fuerzas sobre un eje. Por lo tanto, mediante las balanzas se pueden medir las fuerzas en el eje “x” que se corresponden con la resistencia aerodinámica que ejerce el viento sobre el cuerpo dispuesto en el área de ensayo.

La medición de las cargas sobre un modelo a escala proporciona suficiente información para predecir el comportamiento real que tendría el prototipo en las condiciones reales de funcionamiento. Para hacer una analogía adecuada, como se verá posteriormente con mayor detalle, es necesario cumplir unas condiciones de semejanza geométrica relacionada con una serie de número adimensionales.

Gracias a la semejanza entre el modelo y el prototipo a escala real se puede predecir su comportamiento y evitar situaciones de peligro en ciertas condiciones de funcionamiento. Por ejemplo, se puede predecir la velocidad máxima a alcanzar por una aeronave sin que se produzca bataneo o el ángulo de ataque que provoca entrada en pérdida. Otro aspecto a destacar en el campo de la aeronáutica es, por ejemplo, la verificación de la optimización de un perfil antes de su fabricación, ahorrando así grandes costes.

Los requisitos principales de una balanza para un túnel de viento son las siguientes:

- **Alta sensibilidad:** teniendo en cuenta que se desea conseguir una señal eléctrica apreciable para una determinada deformación, se pretende que la mayor parte de la componente a medir sea tomada por el elemento de



medición que actúa en esa dirección. Por tanto, el elemento de medición debe poseer baja rigidez en la dirección de la componente a evaluar y la mayor posible en la otra dirección.

- **Linealidad y repetitividad:** la balanza debe ser un sistema que se integre entre sus partes, sin desplazamiento relativo entre ellas, exceptuando aquellos causados por deformación elástica incluyendo el movimiento entre las conexiones del modelo y la balanza.
- **Baja histéresis:** para reducir este efecto, los elementos elásticos deben poseer un elevado módulo de Young, como pueden ser los aceros aleados de alta resistencia o bronce al berilio, pues poseen buenas propiedades elásticas, poca deformación y elevada resistencia a fatiga.
- **Baja interacción de los componentes:** este objetivo se logra disminuyendo los desplazamientos del modelo causado por la deformación de los elementos sensores y el sistema de soporte. Se requerirá elevada rigidez en los elementos que transmiten los esfuerzos.
- **Baja sensibilidad a la temperatura:** hay que asegurar que los elementos estructurales y de medición de la balanza no sufran problemas de fatiga térmica, producidos por las dilataciones y contracciones de los cuerpos físicos como consecuencia de sucesivos aumentos y disminuciones de la temperatura. (López, 2017)

2.1.- Tipos de balanzas

Existen dos grandes grupos de balanzas aerodinámicas: externas e internas.

2.1.1.-Balanzas externas

En la Figura 1 se muestra un ejemplo de este tipo de balanzas, las cuales se ubican fuera del modelo y dentro de la cámara de pruebas. La fuerza aerodinámica total y los momentos se separan con diferentes sistemas mecánicos. El modelo se instala en la cámara de pruebas del túnel mediante soportes que lo vinculan a la balanza. Las componentes de fuerzas y momentos se determinan mediante un sistema de ejes “balanza” paralelo al sistema de ejes de viento del túnel de viento.



La principal ventaja del uso de este tipo de balanzas es que se pueden utilizar en numerosos estudios con diversos modelos, cambiando solo el tipo y número de soportes de la pieza de ensayo. Además, como está fuera del modelo de estudio, si necesita mantenimiento es más sencillo a priori trabajar sobre ella.

La principal desventaja de este tipo de balanzas es que, en mayor o menor medida, interfieren en el estudio al desviar el flujo de aire en el espacio que están ocupando. Además, otra de las desventajas es el elevado peso de sus elementos. Por la inercia de los sistemas de medición, estas balanzas no pueden usarse en túneles de tamaño pequeño. (López, 2017)

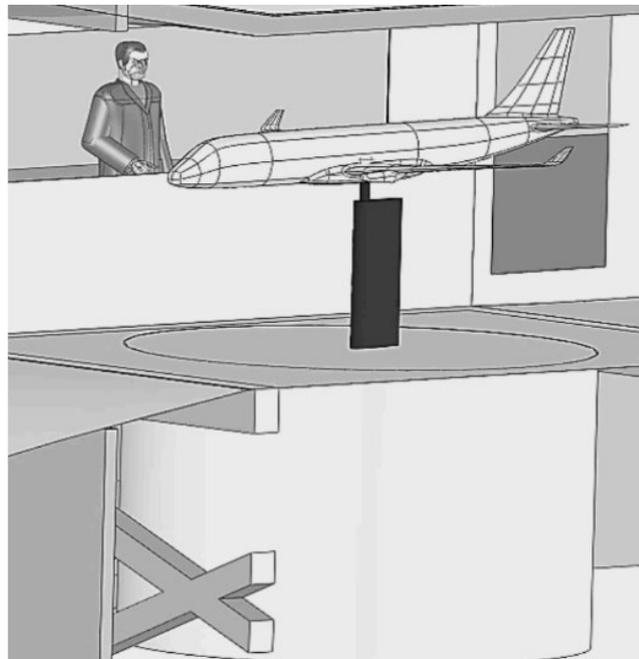


Figura 1. Balanza externa (Aguirre, Astiz, Ferrandez, & Meroniuc, 2016)

Algunos tipos de balanzas externas a destacar son:

Balanza de alambre



Fue uno de los primeros tipos de balanza que se utilizaron en túnel de viento. Su principio de funcionamiento consistía en colgar el modelo de estudio de forma inversa sobre uno de los cables y se determinaba la sustentación y la resistencia sobre el modelo a través de la tensión que se generaba. El principal inconveniente está relacionado con el peso del modelo y su aerodinámica, pues la tensión de los cables no puede llegar a cero, es decir, no se puede medir el ángulo de ataque al que deja de sustentar. Otro inconveniente surge del arrastre generado por los cables, el cual es difícil de medir. Además, es evidente que los cables tienden a romper, lo que produce la pérdida del modelo. Por tanto, este tipo de balanzas no se usan hoy en día por su falta de versatilidad y robustez.

Balanza de plataforma

Este tipo de balanza utiliza tres o cuatro soportes para el modelo sobre una placa de distribución, siendo las más empleadas en el ámbito de la aeronáutica para los túneles de viento. Las ventajas más reseñables son:

- Robustez y versatilidad
- Construcción y montaje sencillo

Sin embargo, las desventajas asociadas son las siguientes:

- Se dan momentos de balanceo y guiñada (movimiento de rotación del modelo con relación a su eje vertical) que aparecen como pequeñas diferencias entre grandes fuerzas.
- El centro de resolución de la balanza no se encuentra sobre el modelo, de forma que el momento de cabeceo debe ser transmitido del centro de la plataforma al centro de giro del modelo.
- La fuerza de resistencia provoca un falso momento de cabeceo sobre la célula de carga. Además, la carga lateral conlleva a un falso momento de balanceo. Es necesario restar estas interacciones de las mediciones.



Por tanto, es importante minimizar estos inconvenientes al máximo para obtener unos valores lo más fiables posibles. Es gracias a los sistemas de adquisición de datos que estas desventajas se han reducido de forma importante.

Balanza de yugo

Este tipo de balanzas ofrece una ventaja sobre las anteriores, pues los momentos son leídos respecto del modelo al estar el centro de resolución sobre la maqueta. Sin embargo, en este caso se producen mayores deformaciones, especialmente en cuanto a fuerza lateral y momentos de cabeceo.

La estructura de la balanza debe ser mayor que el ancho de la cámara de ensayos con el objetivo de que los brazos superiores para la resistencia aerodinámica queden en una posición adecuada. Por tanto, resulta un brazo de palanca para la guiñada excesivamente largo. Por otro lado, los altos pilares de los soportes sufren grandes deflexiones.

Balanza piramidal

Este tipo de balanza evita los inconvenientes que se dan normalmente en las balanzas anteriores. Como ventajas cabe destacar que la lectura de los momentos se realiza alrededor del centro de resolución, mientras que las seis componentes son inherentemente separadas y leídas de forma independiente y directa mediante seis unidades de medición.

Hoy en día, la mayoría de las balanzas externas proporcionan un montaje determinado para cada tipo de modelo. Esto es fruto de la incorporación de mecanismos que permiten variar el ángulo de ataque y la guiñada. Además, las cargas que se generan sobre el modelo son transmitidas mediante un sistema de galgas que separa las fuerzas en componentes, y a partir de estos se obtienen cada uno de los momentos generados.



2.1.2.-Balanzas internas

Estas se colocan en el interior del modelo, de forma que no se introducen interferencias en el flujo de viento por parte de los componentes de la balanza. Sin embargo, es necesario un soporte mecánico para mantenerlo en la cámara de pruebas y modificar su orientación si es necesario. Por tanto, esta opción es menos flexible si se quieren ensayar diferentes modelos con diferentes geometrías. (López, 2017)

2.2.- Principio de funcionamiento

Como se ha comentado previamente, el objetivo final de una balanza aerodinámica es la medición de las fuerzas ejercidas sobre un cuerpo por el fluido, el cual pasa por este a una determinada velocidad. Tal y como se ha visto en el apartado 2.1.- existen diversos diseños que difieren en gran medida unos de otros. Sin embargo, el principio de funcionamiento es el mismo.

El flujo externo que atraviesa el fluido a una determinada velocidad produce unos esfuerzos que se transmiten a la base. En dicha base, se encuentra una o más células de carga en función del número de fuerzas que se quieran medir en distintos ejes. Estas células de carga están compuestas por galgas extensiométricas (Figura 2). En líneas generales, su principio de funcionamiento se basa en la variación de resistencia que se produce cuando un conductor es sometido a una tensión o esfuerzo de compresión, es decir, mostrará una pequeña variación de su resistencia ante un cambio en su longitud debida a la deformación del material. Las galgas extensiométricas pegadas a lo largo de la balanza tienen la característica de variar su resistencia en función de la presión que se aplique sobre ellas. Los datos adquiridos durante los ensayos serán voltajes de salida respecto al tiempo para cada una de las galgas extensiométrica instaladas, por lo que en primer lugar es necesario convertir estas lecturas de voltaje.



Posteriormente, es necesario un sistema de adquisición de datos que transforme esos voltajes de salida a un valor numérico determinado en función del parámetro que se quiera medir.

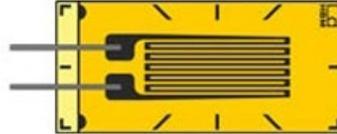


Figura 2. Galga extensiométrica contenida en una célula de carga

2.3.- Aplicaciones

Las balanzas aerodinámicas poseen una amplia variedad de aplicaciones en diferentes áreas de la ingeniería e investigación. Algunas de las aplicaciones más comunes son:

- **Diseño de vehículos aerodinámicos:** donde son fundamentales en el diseño y desarrollo de vehículos terrestres, aéreos y marítimos con el fin de evaluar y optimizar la resistencia al avance. Esto incluye aviones, automóviles, trenes de alta velocidad, embarcaciones y vehículos espaciales.
- **Pruebas aerodinámicas en edificios y estructuras:** estos equipos son cruciales para garantizar la seguridad y estabilidad en el área de arquitectura e ingeniería civil al permitir el estudio de la resistencia al viento de edificios, puentes, torres y otras estructuras.
- **Investigación en túneles de viento:** al ser empleadas para medir la fuerza de arrastre, sustentación y momentos de torsión sobre modelos a escala de aviones, automóviles, edificios y otros objetos. Estos datos son fundamentales para la comprensión del flujo de aire alrededor de objetos y optimizar así su diseño.
- **Desarrollo de equipos deportivos:** en deportes tales como el ciclismo, el esquí o el automovilismo, estos equipos se utilizan para mejorar el diseño



de cascos, trajes o bicicletas con el fin de minimizar la resistencia al viento y mejorar el rendimiento del atleta o su vehículo.

- **Pruebas de eficiencia energética en la industria:** en equipos y maquinaria como ventiladores, compresores y turbinas, ayudando a la optimización del diseño de equipos para reducir el consumo energético y mejorar su rendimiento.
- **Investigación en energía eólica:** estas balanzas se emplean en el estudio del comportamiento de las palas de los aerogeneradores, optimizando su diseño con el objetivo de maximizar la producción energética y minimizar el impacto ambiental.



3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Antes de desarrollar el trabajo realizado es esencial presentar una serie de fundamentos teóricos, tanto físicos como de la plataforma electrónica. Estos fundamentos son cruciales para comprender completamente las acciones llevadas a cabo para lograr una simulación correcta del funcionamiento del equipo.

3.1.- Características generales del flujo externo

Todo cuerpo inmerso en una corriente de fluido está sujeto a fuerzas y momentos dependientes de la forma y orientación con respecto al flujo. La fuerza paralela al flujo se llama arrastre o resistencia y se considera positiva cuando va en el mismo sentido que el flujo. Por tanto, si un objeto se mueve contra el flujo deberá vencer esta fuerza. El arrastre es una fuerza mecánica generada por la interacción y contacto de un cuerpo rígido y un fluido, requiriendo que el cuerpo esté en contacto con el fluido y exista un movimiento relativo entre ambos. (Souza, Girardi, & Oliveira, 2017). Como fuerza, el arrastre es un vector con dirección contraria al movimiento del cuerpo. Existen muchos factores que afectan la magnitud del arrastre siendo los más significativos la magnitud de la sección efectiva de impacto y la forma de la superficie.

Los cuerpos se clasifican generalmente en tres categorías:

- **Bidimensionales:** cuerpos con un largo supuesto infinito y una sección transversal constante en tamaño y forma (Figura 3 (a)).
- **Axisimétricos:** cuerpos con una forma de sección transversal constante de revolución alrededor de un eje de simetría. (Figura 3 (b)).
- **Tridimensionales:** cuerpos que no poseen ni línea ni plano de simetría. (Figura 3 (c)).

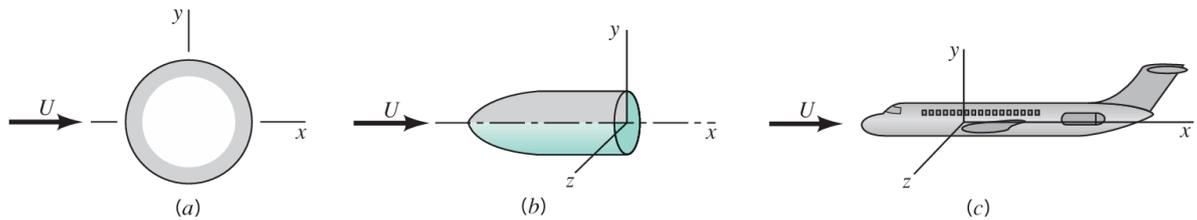


Figura 3. Clasificación del flujo (a) bidimensional; (b) axisimétrico; (c) tridimensional

Una superficie muy suave y encerada produce menos arrastre que una rugosa. A lo largo de la superficie se genera una capa de borde formada por moléculas de baja energía cinética. La magnitud de la fricción en la superficie depende de las características de esta capa, la cual se encuentra en la proximidad inmediata de la superficie del cuerpo. Por tanto, el objetivo de los ensayos en túnel de viento es la de simular el flujo alrededor de cuerpos o sus modelos a escala.

Los cuerpos también se pueden clasificar en función de su grado de aerodinámica:

- **Cuerpos aerodinámicos:** alteran mínimamente el fluido a su alrededor. Un ejemplo serían los coches de Fórmula 1 y los perfiles aerodinámicos.
- **Cuerpos romos:** alteran significativamente el fluido a su alrededor. Esto incluye por ejemplo a paracaídas y edificios. (Young, Munson, & Okiishi, 2001)

3.2.- Conceptos de arrastre y sustentación

Cuando un cuerpo se mueve en el seno de un fluido se genera una interacción entre ambos, que se traduce en fuerzas resultantes que actúan tanto sobre el fluido como en la superficie del objeto. Esta interacción se describe en términos de tensiones (τ_w) debidas a los efectos viscosos y presiones (p) ejercidas sobre la superficie del cuerpo. Las tensiones y las presiones varían en magnitud y dirección a lo largo de la superficie del cuerpo (Figura 4).



Por tanto, el esfuerzo cortante (τ_w) es la fuerza tangencial debida a los efectos viscosos del fluido, mientras que la presión (p) es la fuerza normal debida a la presión del fluido sobre la superficie del cuerpo. Así, las fuerzas resultantes se dividen en dos componentes principales:

- **Arrastre** (Drag, \mathcal{D}): es la fuerza resultante en la dirección de la velocidad del fluido aguas arriba (Figura 4.c.).
- **Sustentación** (Lift, \mathcal{L}): es la fuerza resultante perpendicular a la dirección de la velocidad del fluido aguas arriba (Figura 4.c.).

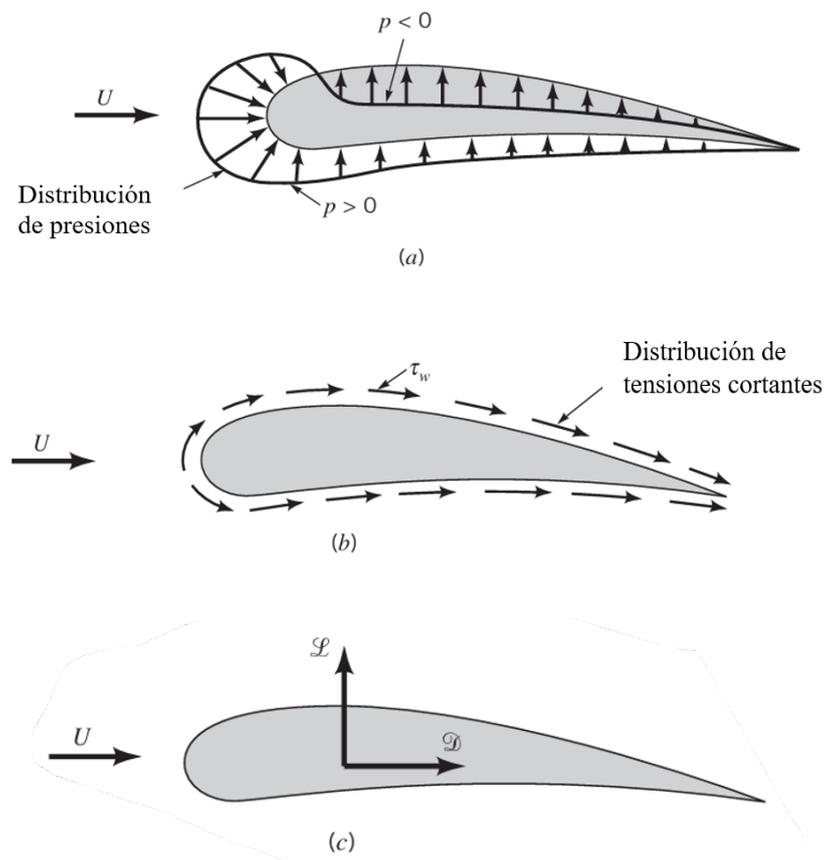


Figura 4. Esfuerzos generados sobre un cuerpo bidimensional por el fluido que los rodea. (a) Distribución de presiones; (b) Distribución de cortantes; (c) Fuerza resultante (sustentación y arrastre)

La fuerza total que actúa sobre un cuerpo debido a la distribución de presiones y esfuerzos cortantes se puede calcular integrando estos efectos a lo largo de la superficie del cuerpo (Figura 5).



Las componentes netas “x” e “y” de la fuerza sobre el objeto son:

$$\text{Arrastre (Drag, } \mathcal{D} \text{)} : \mathcal{D} = \int dF_x = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (3.1)$$

$$\text{Sustentación (Lift, } \mathcal{L} \text{)} : \mathcal{L} = \int dF_y = - \int p \sin \theta \, dA + \int \tau_w \cos \theta \, dA \quad (3.2)$$

Donde θ es el ángulo entre el vector normal a la superficie y la dirección del flujo. Por otro lado, dA es un elemento infinitesimal de área en la superficie del cuerpo (Figura 5) (Young, Munson, & Okiishi, 2001).

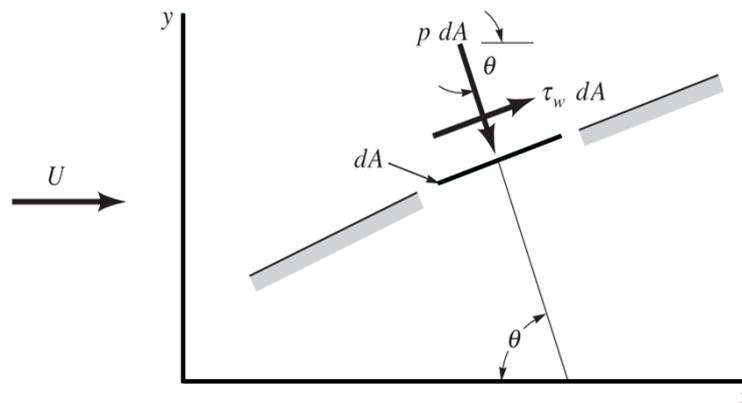


Figura 5. Esfuerzos cortantes y de presión sobre la superficie de un pequeño elemento de un cuerpo (Young, Munson, & Okiishi, 2001)

3.3.- Números adimensionales

Los números adimensionales facilitan la comprensión de los fenómenos del flujo de fluidos, haciendo posible el estudio de la Mecánica de Fluidos mediante datos experimentales. Además, permiten analizar fenómenos a mayor escala mediante semejanza geométrica.

Los números adimensionales que será necesario tener en cuenta para el tipo de flujo de estudio en el presente trabajo son el número de Reynolds y el número de Mach. Dado que no hay entre fases de fluidos la tensión superficial no es importante. Además, la gravedad no afectará a los patrones de flujo, por lo que no es necesario considerar el número de Froude. El número de Mach será importante



para flujos de alta velocidad en los que la velocidad del fluido sea comparable a la velocidad de movimiento del objeto.

Por un lado, el parámetro determinante del flujo es el número adimensional de Reynolds, que se define como:

$$Re = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosidad}} = \frac{V\rho L}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (3.3)$$

Donde:

- $\rho = \text{densidad del fluido } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- $V = \text{velocidad media del flujo } \left(\frac{m}{s}\right)$
- $L = \text{longitud característica (m)}$
- $\mu = \text{viscosidad dinámica } \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$
- $\nu = \text{viscosidad cinemática } \left(\frac{m^2}{s}\right)$

Mediante los ensayos realizados con la balanza aerodinámica se puede observar el comportamiento de las geometrías de estudio para diferentes números de Reynolds.

Por otro lado, el número de Mach se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en el que se mueve dicho objeto. Por tanto, sirve para diferenciar el flujo incompresible del flujo compresible. Matemáticamente:

$$Ma = \frac{F_{inercia}}{F_{elásticas}} = \frac{V}{a} \quad (3.4)$$

Donde V sería la velocidad del flujo en el túnel de viento (m/s) y a es la velocidad del sonido, que se considera de 330 m/s.

El análisis dimensional permite expresar la fuerza aerodinámica en términos de un coeficiente de fuerza adimensional C_R , el número de Reynolds Re , y el número



de Mach Ma . Este enfoque reduce significativamente la complejidad del problema al limitar las variables independientes a considerar. Por lo tanto, cualquier variación de la fuerza aerodinámica se puede entender y predecir analizando C_R como función de Re y Ma .

Para simplificar el análisis de las fuerzas aerodinámicas y hacerlas comparables entre diferentes situaciones se utilizan los coeficientes adimensionales de sustentación y arrastre:

$$\text{Coeficiente de sustentación: } C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (3.5)$$

$$\text{Coeficiente de arrastre: } C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (3.6)$$

Donde:

- $\rho = \text{densidad del fluido } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- $U = \text{velocidad del fluido aguas arriba } \left(\frac{m}{s}\right)$
- $A = \text{área del objeto } (m^2)$

Hay que tener en cuenta que típicamente esta área se toma como la superficie en planta (vista desde arriba) en el caso del coeficiente de sustentación o el área frontal (proyectada en la dirección del flujo) en el caso del coeficiente de arrastre.

Estos coeficientes permiten determinar aproximadamente los valores medios de arrastre y sustentación mediante simplificaciones en el análisis, ya sea a través de técnicas numéricas o experimentales. Utilizar coeficientes adimensionales facilita la comparación entre diferentes cuerpos y condiciones de flujo, y es fundamental para el diseño y análisis en ingeniería aerodinámica. (Bertin & Cummings, 2014)



3.4.- Capa límite

El método más corriente de análisis de flujos externos es el experimental. Una de las herramientas es la teoría de capa límite, formulada por Ludwig Prandtl en 1904 para una placa plana. Los flujos externos no están confinados, pudiendo expandirse sin importar cuánto crezca la capa límite. Los flujos a altos números de Reynolds (Figura 6.b) son muchos más fáciles de tratar mediante el acoplamiento de la capa límite tal y como demostró Prandtl en 1904 por primera vez.

Las capas viscosas, tanto laminares como turbulentas, son muy delgadas, incluso más de lo que se muestra en la Figura 6. Por tanto, se define δ , el espesor de la capa límite, como el lugar geométrico de los puntos donde la velocidad u paralela a la placa alcanza el 99% del valor de la velocidad exterior U . La distribución de presiones se determina a partir de la teoría no viscosa, como si la capa límite no existiera. El campo externo de presiones gobierna el flujo de la capa límite y actúa como una función forzante en la ecuación de cantidad de movimiento a lo largo de la superficie.

Para cuerpo esbeltos, tales como placas y perfiles paralelos a la corriente incidente, la suposición de que la interacción entre la capa límite y la distribución de presiones de la corriente exterior es despreciable es una buena aproximación.

Sin embargo, para cuerpo romos, incluso a altos números de Reynolds, hay una discrepancia en el concepto de acoplamiento entre la zona viscosa y no viscosa. En la Figura 7 se muestran dos esquemas de flujo alrededor de cuerpos romos bidimensionales o tridimensionales. En el esquema de flujo ideal (Figura 7.a) existe una película delgada o capa límite alrededor del cuerpo y una estela viscosa muy delgada en la parte posterior. La teoría de la capa límite funcionaría perfectamente para este esquema. Sin embargo, no se cumple. En el caso de la representación del flujo real (Figura 7.b), la capa límite es delgada en la zona frontal del cuerpo, de incidencia de la corriente, donde la presión disminuye a lo largo de la superficie (gradiente de presión favorable). No obstante, en la parte posterior de la capa límite se encuentran presiones crecientes (gradiente de presión adverso),



desprendiéndose y formándose así una estela amplia y pulsante. La corriente principal se ve deflectada a causa de la estela, de forma que el flujo exterior difiere bastante del que predice la teoría no viscosa modificada solamente por los efectos de una capa límite delgada (White, 2004).

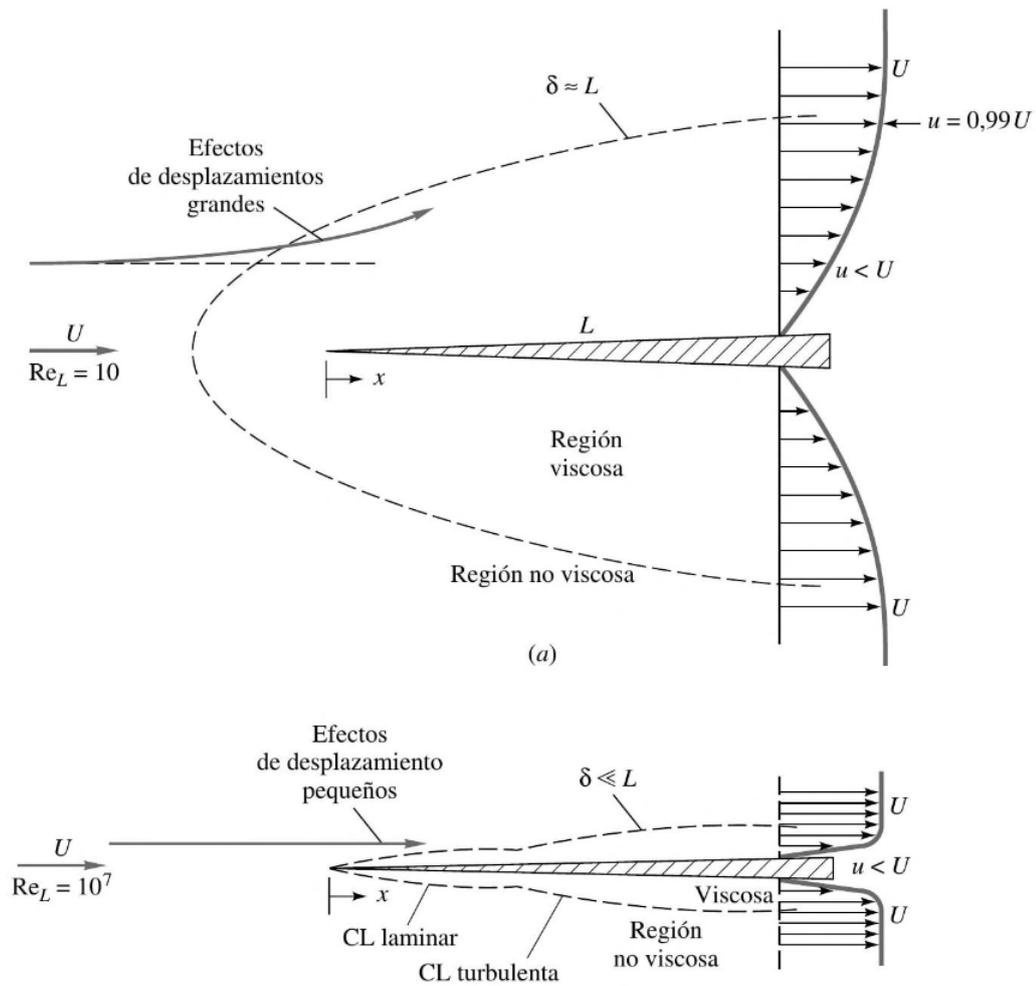


Figura 6. comparación del flujo alrededor de una placa plana: (a) flujo laminar a bajos números de Reynolds; (b) flujo a altos número de Reynolds (White, 2004)

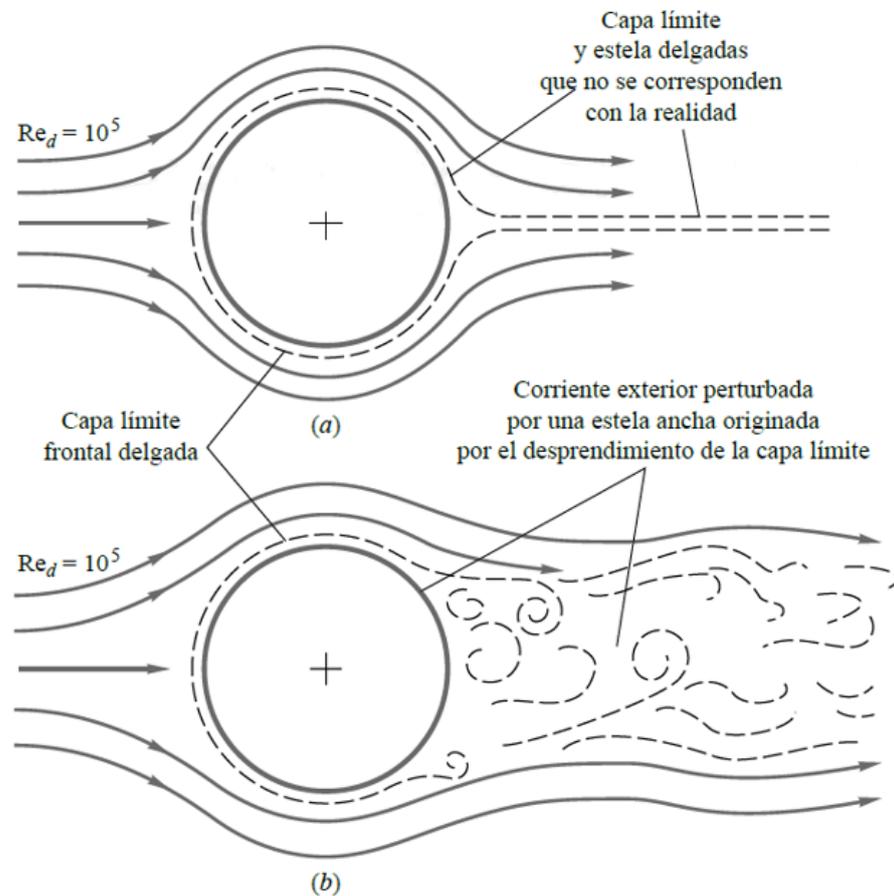


Figura 7. Interacción entre las regiones viscosa y no viscosa en la parte posterior del flujo alrededor de un cuerpo romo: (a) flujo ideal; (b) flujo real (White, 2004)

3.4.1.-Capa límite turbulenta

La capa límite laminar sobre una placa plana se puede acabar convirtiendo en turbulenta, pero el valor del número de Reynolds para el que se produce no es único (White, 2004). La estructura del flujo en la capa límite turbulenta es muy compleja, aleatoria e irregular. El flujo puede considerarse como una mezcla de remolinos entrelazados de diferentes tamaños (diámetros y velocidades angulares). No hay solución exacta para la capa límite turbulenta. Por tanto, es necesario recurrir al uso de relaciones empíricas para la tensión cortante y el coeficiente de arrastre correspondiente.



En líneas generales, el coeficiente de arrastre de una placa plana de longitud ℓ , definido como $C_{Df} = \frac{D_f}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$, es función del número de Reynolds, Re_ℓ , y la rugosidad relativa, $\frac{\varepsilon}{\ell}$. La Figura 8 muestra los coeficientes de arrastre de una placa plana en los dos regímenes: laminar y turbulento. Como se puede observar, para condiciones de capa límite laminares el coeficiente de arrastre es función únicamente del número de Reynolds, mientras que la rugosidad superficial no es relevante. Sin embargo, en el caso del flujo turbulento este último parámetro afecta a la tensión cortante y, consecuentemente, al coeficiente de arrastre. El flujo en la capa límite en una placa plana horizontal se rige por el equilibrio entre los efectos de inercia y las fuerzas viscosas, mientras que la presión permanece constante.

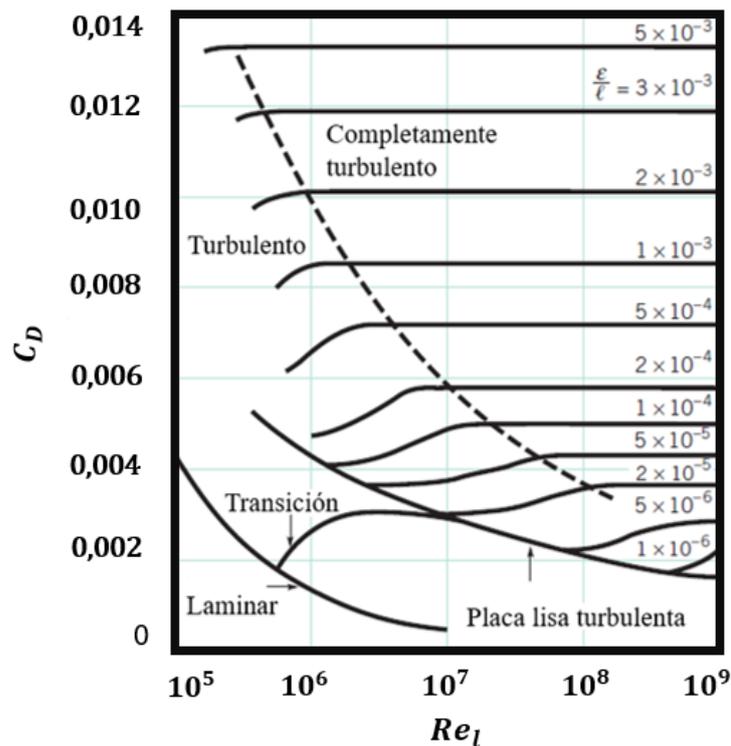


Figura 8. Coeficiente de resistencia por fricción para una placa plana paralela al flujo ascendente (Young, Munson, & Okiishi, 2001)



3.4.2.-Efectos del gradiente de presión

En líneas generales, cuando un fluido atraviesa un determinado objeto el campo de presiones resultante no es uniforme. Tal y como se comentó en la Figura 7, a altos números de Reynolds se forman capas límites relativamente finas a lo largo de la superficie. Dentro de estas capas límite la componente del gradiente de presión en la dirección de la corriente (a lo largo de la superficie del cuerpo) no es nula. Sin embargo, el gradiente de presión normal a la superficie es significativamente pequeño y, por tanto, si se midiera la presión desde la superficie del objeto hasta el borde de la capa límite resultaría una presión constante. Sin embargo, si el objeto es curvo este gradiente en dirección normal ya no sería nulo.

3.5.- Parámetros que influyen en el valor del coeficiente de arrastre

El arrastre neto se produce, como ya se comentó previamente, debido a los efectos de la presión y la tensión cortante. A continuación, se exponen brevemente los diferentes parámetros que influyen en el valor numérico del coeficiente de arrastre.

3.5.1.-Forma del objeto

Es evidente que el coeficiente de resistencia aerodinámica de un objeto depende de su forma, que puede ser aerodinámica o roma. Cuanto más roma sea el cuerpo mayor será su coeficiente de resistencia. Esta dependencia se ilustra en la resistencia en una elipse (Figura 9). Su relación de aspecto es l/D , donde D y l son el grosor y la longitud paralelos al flujo. El coeficiente de arrastre $C_D = \frac{D}{0.5\rho U^2 bD}$ está basado en el área frontal $A = b \cdot D$, donde b es la longitud normal al flujo. Con una relación de aspecto de $\frac{l}{D} = 0$, como en el caso de una placa plana inmersa en



un flujo en dirección normal, se obtiene un valor del coeficiente de arrastre de 1,9. Por otro lado, con $\frac{l}{D} = 1$, se obtiene el valor correspondiente para un cilindro circular. A medida que esta relación de aspecto aumenta, como se puede observar, el valor de C_D disminuye.

Para relaciones de aspectos muy grandes ($\frac{l}{D} \rightarrow \infty$) la elipse se comporta como una placa plana paralela al flujo. En estos casos, el arrastre por fricción es mayor que el arrastre por presión. Para cuerpos extremadamente delgados como el caso de esta elipse, una placa plana o perfiles aerodinámicos muy delgados, es habitual utilizar el área de la forma plana $A = b \cdot l$ para definir el coeficiente de arrastre. Es evidente que en ambos casos la magnitud resultante ha de ser la misma.

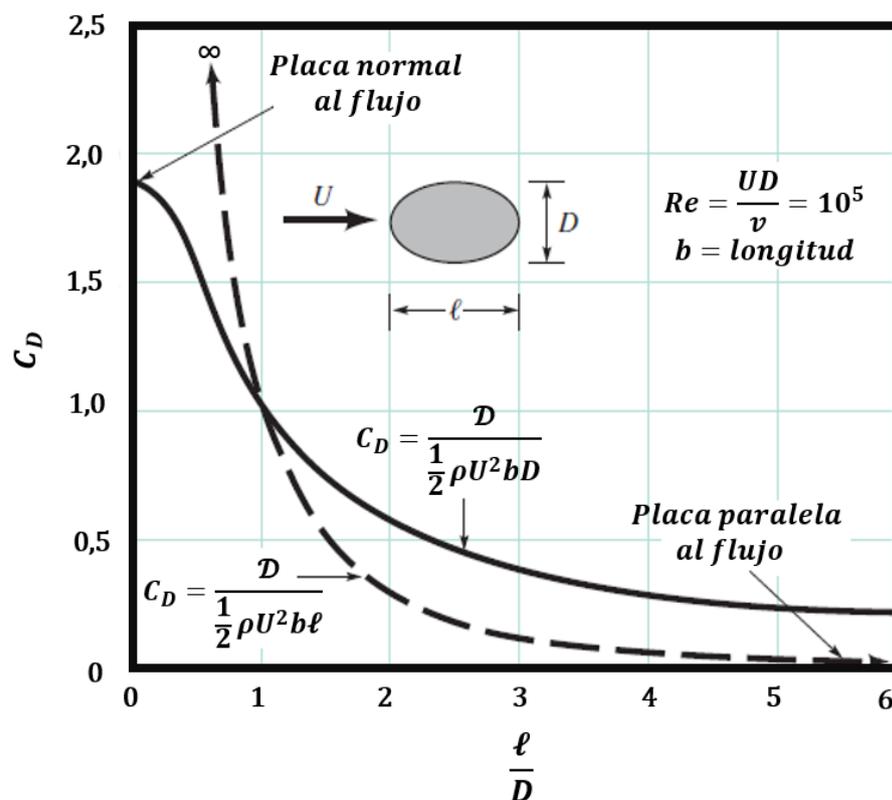


Figura 9. Coeficiente de arrastre para una elipse con la zona característica ya sea de zona frontal $A =$ o el área en planta $A = l \cdot D$ (Young, Munson, & Okiishi, 2001)



3.5.2.-Número de Reynolds

Otro parámetro del que depende en gran medida el coeficiente de arrastre es el número de Reynolds. Los flujos con bajo número de Reynolds ($Re=1$) se rigen por un equilibrio entre las fuerzas viscosas y las fuerzas de presión. Los efectos de inercia son despreciables. En tales casos, se espera que la resistencia sea una función de la velocidad aguas arriba, U , del tamaño del cuerpo, l , y de la viscosidad, μ según la expresión:

$$D = C\mu lU \quad (3.7)$$

Donde C depende de la forma del cuerpo. Por tanto, aplicando la definición de coeficiente de arrastre (3.24) se obtiene:

$$C_D = \frac{\text{constante}}{Re} \quad (3.8)$$

Donde Re hace referencia al número de Reynolds (3.19). En el caso de una esfera se demuestra que $C_D = \frac{24}{Re}$, donde $l = D$ (diámetro de la esfera).

Para la mayoría de los objetos, se considera bajo número de Reynolds hasta un número de Reynolds de aproximadamente 1. Los flujos con números de Reynolds moderados tienden a adoptar una estructura de flujo de capa límite. Para estos flujos, el coeficiente de arrastre tiende a disminuir ligeramente con el número de Reynolds. Un ejemplo es la dependencia $C_D - Re^{-0.5}$ para el caso de capa límite laminar sobre una placa plana.

Para un objeto dado, existe una amplia variedad de situaciones del flujo en función de la magnitud del número de Reynolds. Dependiendo de la forma del objeto, hay un cambio repentino en el carácter del coeficiente de arrastre cuando la capa límite se vuelve turbulenta. En el caso de cuerpos aerodinámicos, el coeficiente de arrastre aumenta cuando la capa límite se vuelve turbulenta porque la mayor parte del arrastre se debe a la fuerza cortante, mayor para el flujo turbulento que para el flujo laminar. No obstante, el coeficiente de arrastre para un



objeto relativamente romo, como el caso de una esfera, disminuye cuando la capa límite se vuelve turbulenta.

Para cuerpos extremadamente romos, como una placa plana perpendicular a la dirección del flujo, este se separa del borde de la placa independientemente de la naturaleza del flujo de la capa límite. Este aspecto se puede ver en la Figura 10, donde se muestra una caracterización de la resistencia aerodinámica en función del número de Reynolds para objetos con diversos grados de aerodinámica, desde una placa plana en posición normal al flujo aguas arriba hasta una placa plana paralela al flujo. Las características que se describen con anterioridad se hacen evidentes (Young, Munson, & Okiishi, 2001).

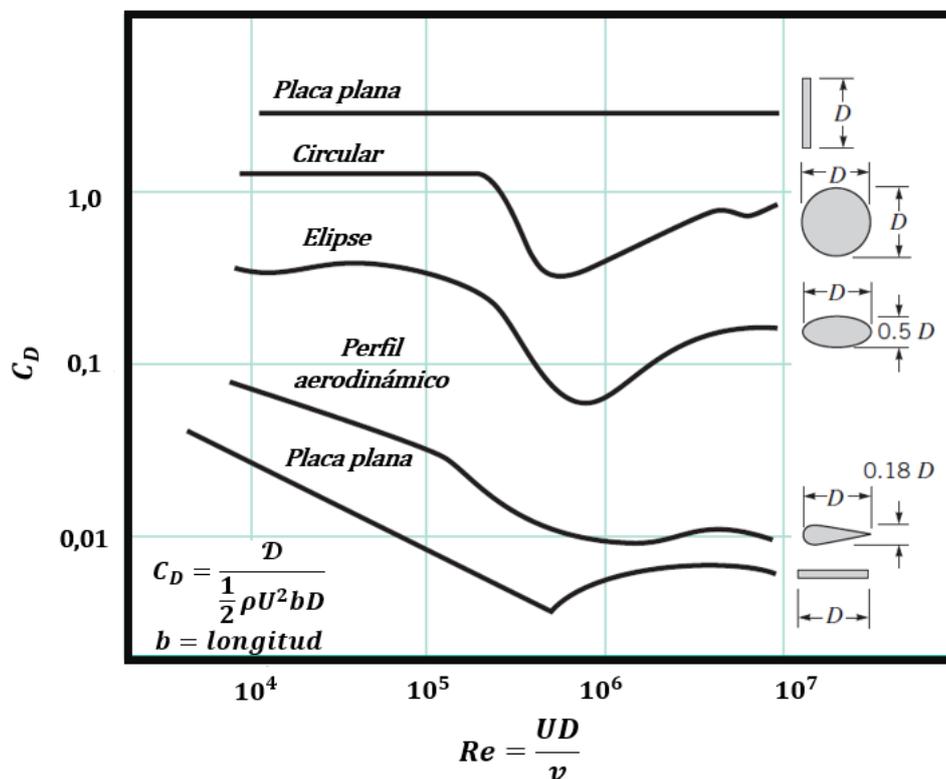


Figura 10. Caracterización del coeficiente de resistencia aerodinámica en función del número de Reynolds para objetos diversos grados aerodinámicos (Young, Munson, & Okiishi, 2001)



3.5.3.-Efectos de compresibilidad

Si la velocidad del objeto es suficientemente grande, los efectos de compresibilidad y el coeficiente de arrastre se convierten en una función del número de Mach ($Ma = \frac{U}{a}$) donde a es la velocidad del sonido en el medio fluido correspondiente. Para números de Ma bajos ($Ma = 0.3$ aproximadamente), los efectos de compresibilidad no son relevantes y el coeficiente de arrastre es esencialmente independiente, incrementándose su dependencia a medida que se incrementa dicho número de Mach. Para la mayoría de los objetos, los valores de C_D aumentan drásticamente en las proximidades de $Ma = 1$ (flujo sónico). Este cambio de carácter se debe a la existencia de ondas de choque. Las ondas de choque son regiones extremadamente estrechas en el campo fluido a través de las cuales los parámetros del flujo cambian de forma casi discontinua, proporcionando un mecanismo para la generación de resistencia que no se encuentra presente en los flujos subsónicos de velocidad relativamente baja.

En la Figura 11 se muestran los coeficientes de arrastre de cuerpos lisos a bajos números de Mach para el caso de cuerpos tridimensionales. En 1851, G.G. Stokes mostró que si el número de Reynolds es muy pequeño ($Re \ll 1$) los términos de aceleración en las ecuaciones de Navier Stokes son despreciables.

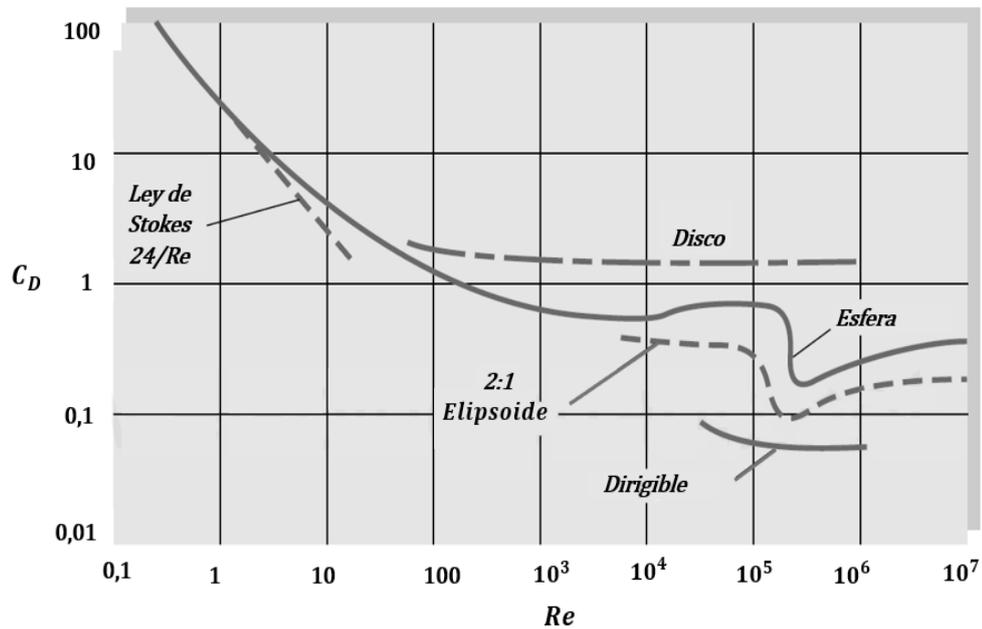


Figura 11. Coeficientes de arrastre de cuerpos lisos a bajos números de Mach para el caso de cuerpos tridimensionales (White, 2004)

En este caso, el movimiento se denomina flujo lento o flujo de Stokes, lo que representa un balance entre los términos de presión y los esfuerzos viscosos. Si la geometría es sencilla, como el caso de una esfera o un disco, pueden encontrarse soluciones al problema que permiten calcular el arrastre del cuerpo. El propio Stokes proporcionó la fórmula para la resistencia en el caso de una esfera como:

$$C_D = \frac{F}{\frac{1}{2} U^2 \left(\frac{\pi}{4}\right) D^2} = \frac{24}{Re_d} \quad (3.9)$$

Esta relación, ya comentada con anterioridad, se representa en la Figura 11 y puede comprobarse que es precisa hasta aproximadamente $Re = 1$. Además, en dicha figura se verifica que las aristas siempre originan la separación de la corriente y una alta resistencia que es independiente del número de Reynolds, como se observa en el caso del disco. De esta forma, el número de Reynolds y el carácter de la capa límite son importantes. La longitud del cuerpo, por lo general, disminuye el arrastre debido a la presión por hacer el cuerpo relativamente más esbelto. No obstante, tarde o temprano el efecto del arrastre debido a la fricción acaba siendo dominante.



3.5.4.-Rugosidad superficial del objeto

En líneas generales, la resistencia se incrementa con la rugosidad de la superficie para los cuerpos aerodinámicos. Como ejemplo, las superficies de las alas de los aviones se diseñan para que sean lo más lisas posible, pues los remaches o las cabezas de los tornillos que sobresalen pueden aumentar de forma considerable la resistencia aerodinámica. Sin embargo, para un cuerpo extremadamente romo como es una placa plana normal al flujo, la resistencia aerodinámica es independiente de la rugosidad superficial, pues el esfuerzo cortante no se encuentra en la dirección del flujo y no contribuye a la modificación de dicha resistencia. Para cuerpos romos como el caso de una esfera (Figura 12) o un cilindro circular, un aumento de la rugosidad de la superficie puede provocar una disminución del arrastre.

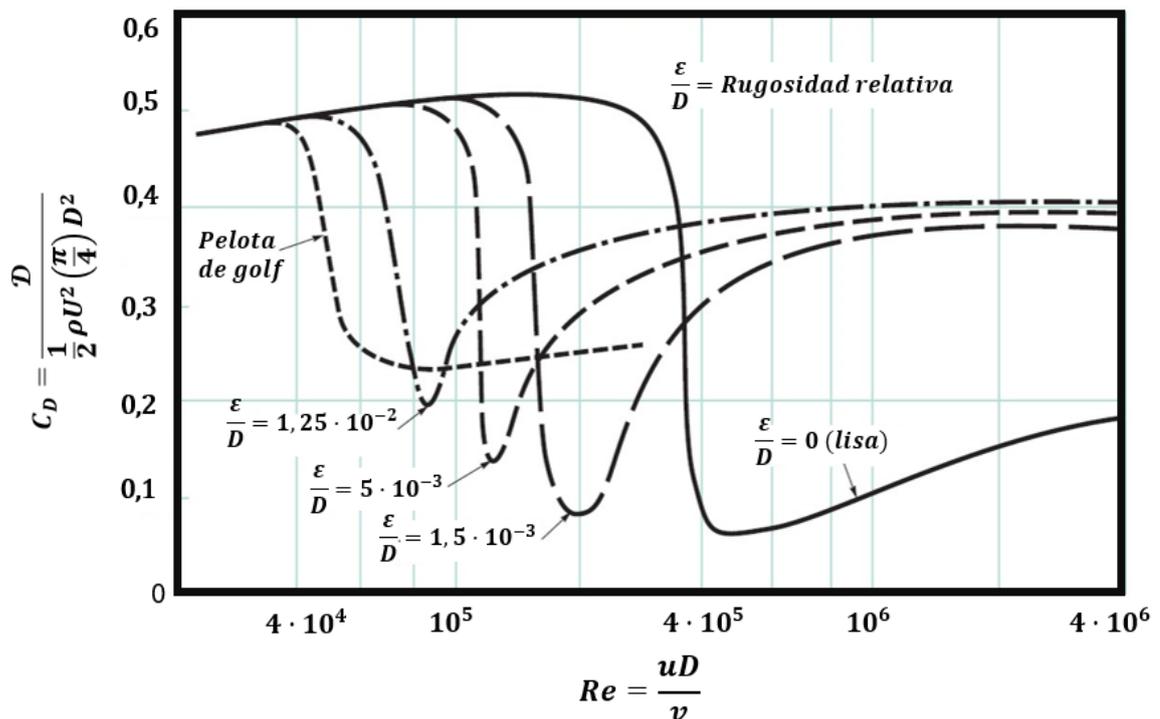


Figura 12. Efecto de la rugosidad superficial en el coeficiente de arrastre de una esfera en función del número de Reynolds (Young, Munson, & Okiishi, 2001).



Cuando el número de Reynolds alcanza el valor crítico $3 \cdot 10^5$ en el caso de una esfera lisa, la capa límite se vuelve turbulenta y la región de la estela detrás de la esfera se hace considerablemente más estrecha. El resultado es una caída importante de la resistencia a la presión con un ligero aumento de la resistencia a la fricción, que combinándose resultan en una menor resistencia global y, por tanto, en un menor coeficiente de arrastre.

La capa límite se vuelve turbulenta a un número de Reynolds más pequeño utilizando una esfera de superficie rugosa. Por ejemplo, el número de Reynolds crítico para una pelota de golf es de aproximadamente $4 \cdot 10^4$. En el rango de $4 \cdot 10^4$ y $4 \cdot 10^5$ su arrastre es considerablemente menor que para el caso de la pelota lisa, como por ejemplo una pelota de pin-pon. El rango del número de Reynolds en este último caso es inferior a $4 \cdot 10^4$.

3.5.5.-Composición del cuerpo

El cálculo aproximado de la resistencia aerodinámica de un cuerpo complejo se puede obtener tratando el cuerpo como la suma de diversas partes. Por ejemplo, la fuerza total ejercida por el viento sobre la asta de una bandera se puede calcular sumando la resistencia aerodinámica producida por los distintos componentes. Esta resistencia se debe a los distintos componentes implicados, es decir, el arrastre de la bandera y el arrastre del mástil. En algunos casos, hay que tener cuidado con este planteamiento debido a las interacciones entre las diferentes partes. Puede que no sea correcto limitarse a la suma del arrastre de los componentes para obtener el arrastre de todo el cuerpo, aunque tales aproximaciones suelen ser razonables.



4. ANÁLISIS DE LA BALANZA EXISTENTE

Como se ha indicado anteriormente, el Área de Mecánica de Fluidos de la Universidad de Oviedo cuenta en la actualidad con una balanza aerodinámica capaz de medir el arrastre sobre cuerpo sumergidos en fluidos (Figura 13). Esta balanza se acopla a un túnel de viento y se utiliza en las prácticas de laboratorio de la asignatura “Mecánica de Fluidos”. La balanza consta de una célula de carga y de un sistema simple de adquisición que permite medir la fuerza media de arrastre. En general, las balanzas aerodinámicas tienen que cumplir una serie de requisitos, entre los que se encuentran: una alta sensibilidad, linealidad y repetitividad, baja interacción entre los componentes y baja histéresis.

Con el objetivo de mejorar las medidas de la fuerza de arrastre, en el presente trabajo se plantea el diseño y montaje de una nueva balanza aerodinámica que mejore las prestaciones de la disponible. En concreto, se quieren mejorar las conexiones entre el objeto a medir y la balanza para que haya un menor desplazamiento relativo entre las diferentes partes de esta. Además, se necesita aumentar las propiedades elásticas y la resistencia a la fatiga de los elementos de la balanza utilizando elementos de acero aleado para disminuir la histéresis. Por último, también se desea poder actuar sobre el sistema de adquisición para realizar una calibración sencilla de la balanza desde el propio sistema.

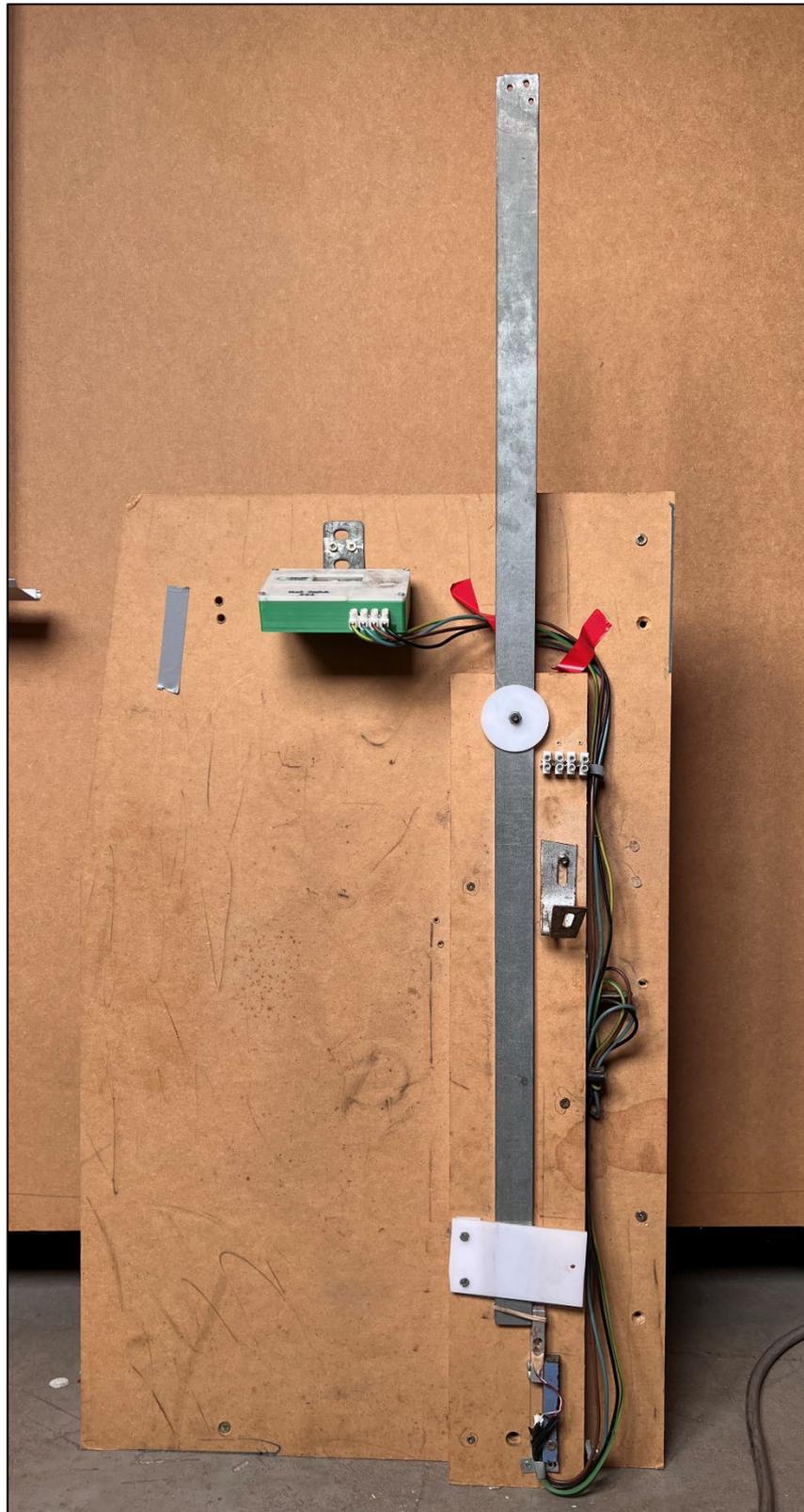


Figura 13. Balanza aerodinámica existente



5. TÚNELES DE VIENTO

Un túnel de viento es una herramienta de investigación desarrollada para ayudar en el estudio de los efectos del aire, uniforme, rectilíneo y a una determinada velocidad, cuando fluye alrededor de objetos sólidos. Con esta herramienta se simulan condiciones que experimenta el prototipo de ensayo de la investigación en una situación real. En el túnel de viento, el objeto o modelo permanece estacionario mientras se propulsa el paso del aire a través de él.

5.1.- Descripción general

Las principales partes que forman un túnel de viento son:

- **Ventilador:** se encarga de producir la corriente de aire del circuito en el que se desarrolla la circulación. La velocidad del ventilador se ajusta para lograr la velocidad de aire requerida para la medición, la cual debe ser constante y uniforme para asegurar la precisión de los resultados.
- **Difusor:** disminuye la velocidad del flujo al aumentar la presión para reducir las pérdidas debidas a la fricción. Al reducir la velocidad, el difusor ayuda a la minimización de las pérdidas de energía por fricción en las paredes del túnel.
- **Cámara de laminarización:** mejora la calidad del flujo de aire, asegurando que sea uniforme y laminar antes de entrar en la cámara de ensayos. Utiliza elementos de red y filtros para eliminar turbulencias y lograr un flujo de aire más estable.
- **Contracción:** aumenta la velocidad del aire concentrando el flujo en la entrada de la sección de ensayos. La sección de contracción es más ancha en la entrada y se estrecha hacia la salida. Esto, según el principio de continuidad, provoca un aumento en la velocidad del aire.
- **Cámara de ensayos:** en esta región de sección constante se coloca el modelo y todos los instrumentos necesarios para realizar las mediciones. En este punto, el aire debe ingresar a esta sección con un flujo paralelo y constante. Por otro lado, debe cumplir con la similitud de variables físicas



como son la densidad y la velocidad. Por tanto, permite medir tanto la interacción del fluido con la estructura como la aerodinámica del objeto y las fuerzas resultantes de esta interacción (fuerzas de arrastre y sustentación) (Cubillos, 2019).

La correcta configuración y funcionamiento de estos componentes es vital para lograr el éxito de los ensayos experimentales realizados en el túnel de viento. Cada parte tiene un rol determinado que contribuye a la precisión de las mediciones, permitiendo así obtener datos fiables sobre el comportamiento aerodinámico de los modelos estudiados.

5.2.- Tipos de túneles de viento

Existen básicamente dos tipos de túneles de viento en función del tipo de circuito (abierto o cerrado) así como dos configuraciones de la cámara de ensayos (abierta o cerrada).

En el caso de los túneles de viento cerrados, se obliga a la corriente a girar sin aumentar considerablemente las pérdidas y las perturbaciones en la misma. A través del difusor se recupera la energía fluida antes de que llegue de nuevo a la zona donde este se encuentra instalado.

Las ventajas asociadas a este tipo de túneles de viento se relacionan con el uso de esquinas y mallas, donde la calidad del flujo es controlada e independiente de otras actividades dentro del edificio, así como sus condiciones climatológicas. Además, la energía requerida es menor para un tamaño definido de la cámara de ensayos. Por último, produce menor ruido cuando se pone en funcionamiento.

Como desventaja se destaca el coste de construcción, debido a su tamaño y al número de elementos de construcción requeridos. Otra desventaja es el calentamiento del flujo cuando es sometido a largos tiempos de funcionamiento, obligando a instalar sistemas de refrigeración.



Por otro lado, en el caso de los túneles de viento abiertos se toma aire directamente de la atmósfera, por lo que el flujo no se recircula directamente por el túnel. Existen túneles abiertos de tipo soplador, en el que el aire se impulsa por un ventilador centrífugo y de tipo succión, donde se emplea un ventilador axial.

La principal ventaja asociada al uso de estos túneles es el menor coste asociado en comparación con los túneles cerrados. Sin embargo, la desventaja más reseñable es que para un tamaño determinado y una velocidad definida, el túnel abierto requiere de mayor energía para funcionar, generando mucho ruido cuando se encuentra en funcionamiento (López, 2017).



6. ELECTRÓNICA Y SOFTWARE

La plataforma de hardware electrónico Arduino se eligió como medio de comunicación entre los sensores y el ordenador encargado de procesar los datos. Esta elección se basó en los siguientes factores:

En primer lugar, Arduino utiliza un lenguaje de programación de software libre, lo que permite modificar fácilmente los códigos de control y rutinas según las necesidades específicas del proyecto. Esta flexibilidad es determinante para adaptar el sistema de adquisición de datos a diferentes tipos de experimentos y configuraciones.

Por otro lado, es la plataforma electrónica más económica del mercado. Esta característica es especialmente relevante en entornos educativos y proyectos de investigación con presupuestos limitados, permitiendo así la implementación de sistemas de adquisición de datos sin incurrir en costos elevados.

Además, una de las mayores ventajas de Arduino es que no requiere conocimientos profundos de electrónica ni de lenguajes de programación. Esto hace que sea accesible para estudiantes y profesionales que pueden centrarse en la adquisición y el análisis de datos sin necesidad de una formación técnica extensa en programación o electrónica.

6.1.- Tarjeta Arduino

En la Figura 14 se puede observar la placa Arduino utilizada en este proyecto, destacando en ella las partes principales empleadas para la conexión física y su función en el sistema de adquisición de datos.

La placa Arduino cuenta con varias interfaces que permiten conectar distintos tipos de periféricos. Estas entradas son cruciales para la recepción de información por parte de los sensores conectados. La información de estos periféricos se



traslada posteriormente al microcontrolador, que se encarga de que todos los datos lleguen a través de los pines de entrada y salida del Arduino.

El microcontrolador es el componente central que gestiona y procesa todos los datos recibidos de los sensores. Este procesamiento incluye la conversión de las señales analógicas a valores digitales que pueden ser utilizados para su posterior análisis. Su función es asegurar que todos los datos llegan correctamente desde los sensores a las interfaces de salida, donde se visualizan o utilizan para controlar otros dispositivos.

Por otro lado, cuenta con una interfaz de salida, que es la que se encarga de llevar la información procesada en Arduino a otros periféricos. Estos periféricos pueden incluir pantallas, altavoces o incluso otras placas de control. En este proyecto, la interfaz de salida juega un papel crucial al mostrar datos en tiempo real y permitir la interacción con el usuario. Se utiliza un display para mostrar los datos procesados y las instrucciones al usuario, así como para indicar el estado del sistema y los resultados de las mediciones, como se verá posteriormente con mayor detalle. Además, puede haber otros periféricos conectados para controlar diferentes aspectos de los ensayos experimentales o para el almacenamiento de datos.

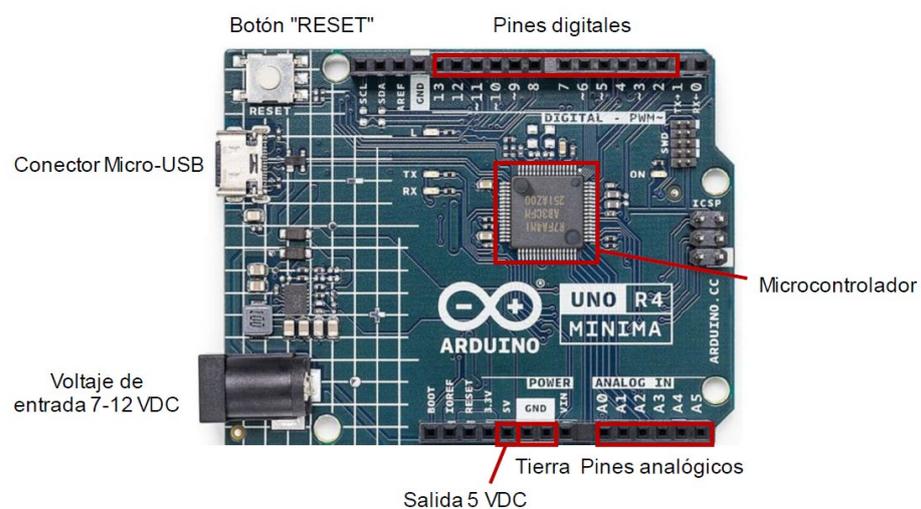


Figura 14. Placa de Arduino (R4)



Por tanto, la placa Arduino, con sus interfaces de entrada y salida, y su potente microcontrolador, forma el núcleo del sistema de adquisición de datos. Esto permite una comunicación eficiente y precisa entre los sensores y el usuario final. Esta configuración asegura la precisión, procesamiento y visualización de todas las mediciones en tiempo real facilitando así el análisis aerodinámico de los cuerpos en el túnel de viento.

6.2.- Entorno de desarrollo integrado (IDE)

En este caso, se empleó el IDE de Arduino como tarjeta electrónica programable para la creación rápida y sencilla de prototipos. Se trata de una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible (se puede trabajar en todas las plataformas informáticas, o casi todas) y fácil de utilizar para los creadores y desarrolladores, permitiendo generar diferentes tipos de microordenadores de una sola placa a los que la comunidad de creadores puede darles diferentes tipos de uso.

Arduino se puede utilizar para el desarrollo de elementos autónomos, o bien para conectarse a otros dispositivos o interactuar con otros programas (interactúa tanto con el hardware como con el software).

Actualmente su uso se cataloga en dos grandes grupos:

Por un lado, se utiliza como un microcontrolador cuando tiene un programa descargado desde un ordenador, funcionando de manera independiente a éste, a la vez que controla y alimenta determinados dispositivos y toma decisiones de acuerdo con el programa descargado e interactúa con el mundo físico gracias a sensores y actuadores.

Por otro lado, haciendo de interfaz entre un ordenador u otro dispositivo que ejecuta una determinada tarea, de forma que traduce esta tarea en el mundo físico



a una acción. Y viceversa pues, gracias a los sensores que están conectados a la placa Arduino, se puede hacer que el ordenador ejecute esa acción.

La plataforma se programa con lenguaje propio basado en lenguaje de programación de alto nivel (similar a C++).

6.3.- Lenguaje Python

El gemelo digital fue desarrollado en Python, un lenguaje de programación versátil que ofrece amplia gama de bibliotecas y herramientas ideales para la simulación, modelado y procesamiento de datos en tiempo real. Esto lo convierte en una opción popular para el desarrollo de gemelos digitales.

En cuanto a sus capacidades, Python permite implementar algoritmos de optimización, aprendizaje automático e inteligencia artificial. Por otro lado, facilita la simulación de sistemas, la predicción de fallos, el mantenimiento predictivo y la evaluación de diferentes escenarios hipotéticos (“what-if”). Existen muchas bibliotecas en Python que son cruciales para el modelo matemático, análisis de datos, visualización y aplicación de técnicas de machine learning. Además, la computación en la nube y servicios de IoT son fundamentales para la implementación de gemelos digitales, ya que permiten recopilar datos en tiempo real de los sistemas físicos. Estos datos se integran con el modelo virtual, proporcionando una representación precisa y actualizada del sistema real. En este caso, se utilizó el broker del Área de Tecnología Electrónica perteneciente al Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Comunicaciones y de Sistemas de la Universidad de Oviedo para implementar este servicio.

Por otro lado, el avance hacia el Internet del todo (IoE) implica la integración de cuatro vectores principales que permiten una transformación profunda en el campo de la electrónica y la instrumentación:



1. Una filosofía
2. Un hardware de bajo coste
3. Unas herramientas gratuitas de software
4. Unos protocolos de comunicaciones ligeros (MQTT)

La balanza aerodinámica está equipada con sensores que miden diversos parámetros físicos. Estos sensores están conectados a una placa Arduino que procesa los datos y los transmite a través de MQTT. MQTT es un protocolo ligero que utiliza una arquitectura de publicador/suscriptor y permite una comunicación eficiente entre la balanza y otros sistemas conectados, como el gemelo digital diseñado en Python. Los datos generados por la balanza se envían a la nube a través del broker MQTT previamente mencionado. La computación en la nube permite almacenar y procesar grandes volúmenes de datos, facilitando el análisis y la toma de decisiones en tiempo real. La implementación de la balanza aerodinámica en un entorno loE es un paso hacia la Industria 4.0, donde los sistemas de medida y control están interconectados, mejorando la eficiencia y la fiabilidad. El uso de MQTT y la arquitectura M2M (Machine to Machine) permite una conexión continua y fiable, donde cada conexión se mantiene abierta y se reutiliza para cada transmisión de datos, asegurando una operación sin interrupciones.



7. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la Figura 15 se presenta un esquema de la metodología de trabajo llevada a cabo para abordar este trabajo y conseguir así el objetivo final: la medida de la fuerza de arrastre ejercida por la fuerza del viento a una determinada velocidad sobre diferentes geometrías ensayadas en el túnel de viento.

Como se puede ver, el diseño y desarrollo de la balanza aerodinámica se dividió en dos grupos principalmente:

Por un lado, se encuentra la parte mecánica, que engloba el diseño y dimensionado de la balanza teniendo en cuenta el túnel de viento donde se va a instalar, así como el proceso de fabricación de las piezas. Algunas piezas tuvieron que ser modificadas debido a la dificultad asociada al proceso de fabricación, el cual se describirá con mayor detalle posteriormente. Esta etapa engloba a su vez el diseño 3D, la propia fabricación de los componentes y su ensamblaje.

Por otro lado, es necesaria la instalación electrónica debido a la necesidad de adquisición de los datos de deformación de la célula de carga. Para ello, es necesario tanto la conexión a la tarjeta Arduino de los componentes físicos que se verán con mayor detalle en el apartado 7.7.- , como la programación del software de recogida y post-procesado de los datos, tarea que se realiza en el IDE de Arduino.

Una vez que se finalizan las tareas que engloban ambos grupos, se procede a la instalación e instrumentación de la balanza en el túnel. Posteriormente es necesario realizar una calibración para dar paso a la realización de los ensayos con los diferentes modelos y condiciones de funcionamiento del túnel.

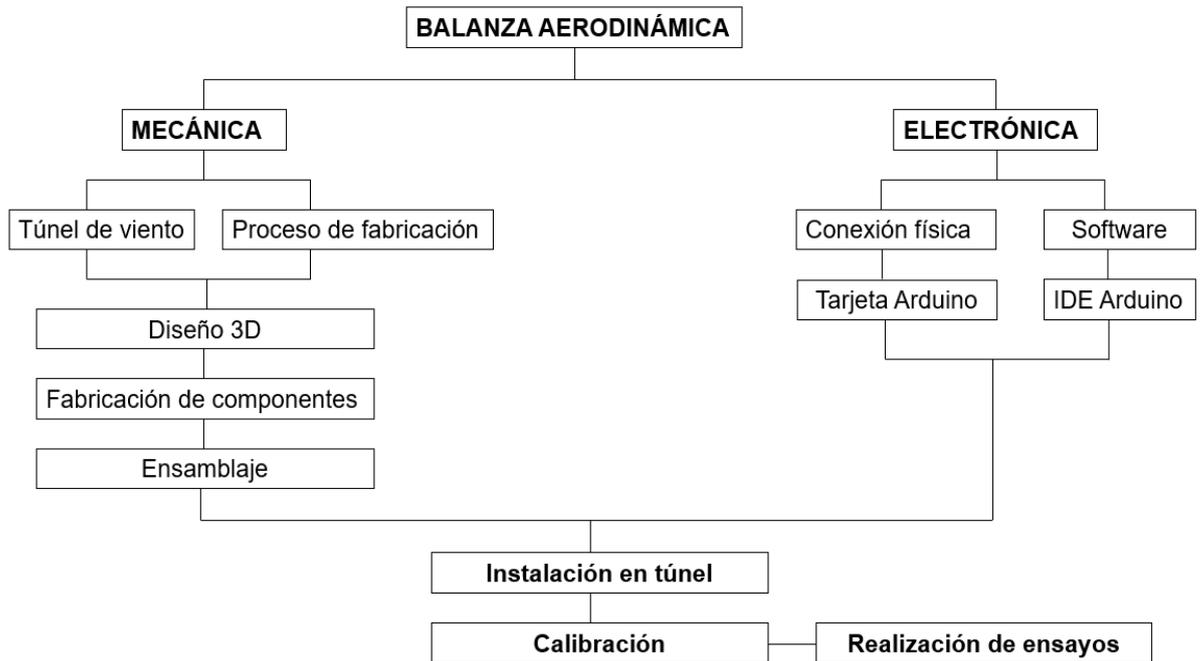


Figura 15. Esquema de la metodología de trabajo

7.1.- Descripción del túnel de viento

A continuación, se presenta un esquema de los componentes y las medidas geométricas del túnel de viento del Área de Mecánica de Fluidos donde se van a realizar los ensayos experimentales. Como se puede ver, se trata de un túnel de impulsión en circuito abierto con una sección de ensayo en la descarga del chorro (donde se colocará la balanza aerodinámica con el modelo de ensayo) de dimensiones $750 \times 750 \text{ mm}^2$. Las características principales del túnel de viento son las siguientes:

- Potencia máxima de 50 kW.
- Velocidades de ensayo de 0-40 m/s, gracias al accionamiento a velocidad variable del ventilador.
- Contracción en la sección de la tobera de 1:12.

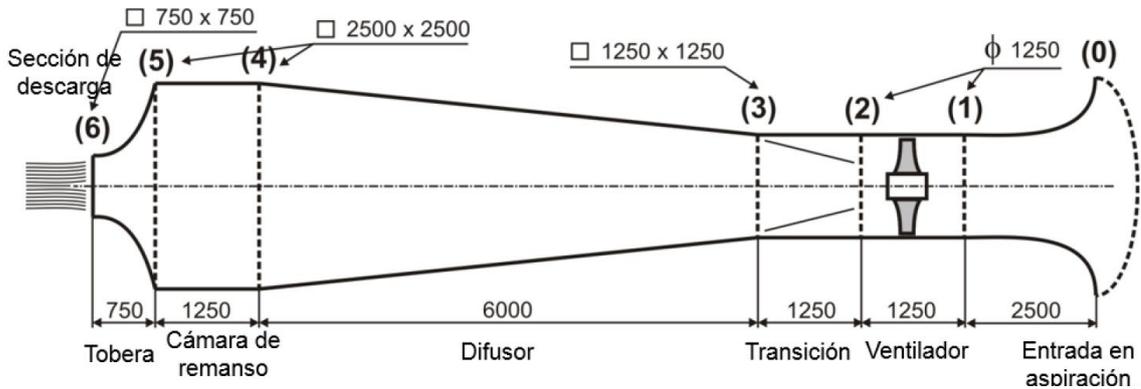


Figura 16. Esquema del túnel de viento de los ensayos experimentales (GPMF, 2024)

7.2.- Instrumentación básica del túnel de viento

La instrumentación de la que consta el túnel de viento es de: un tubo de Pitot, un manómetro en la cámara de remanso y la balanza aerodinámica que se está llevando a cabo este trabajo.

7.2.1.-Manómetro en la cámara de remanso

Este manómetro permite medir de forma directa el caudal de funcionamiento usando la medida de la presión estática. De esta forma (Figura 16), midiendo la presión estática (manométrica) en la cámara de remanso (1) se puede obtener directamente la velocidad en la sección de descarga (2).

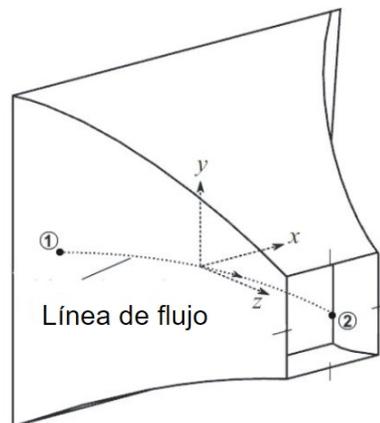


Figura 17. Línea de flujo entre la cámara de remanso (1) y la tobera (2) (GPMF, 2024)



La expresión matemática para la velocidad en la sección de descarga de la tobera es la siguiente:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \frac{1}{AR^2}\right)}} \quad (7.1)$$

Donde AR hace referencia a la relación de áreas (en este caso AR=12). Por tanto, la velocidad en la sección de descarga se puede aproximar como:

$$v_2 \approx \sqrt{\frac{2\rho_{man}gh}{\rho}} \approx 4\sqrt{h} \quad (7.2)$$

7.2.2.-Balanza aerodinámica

Como se ha comentado previamente, se instalará una balanza aerodinámica cuyo diseño, construcción, fabricación, instrumentación y calibración se explicarán posteriormente con mayor detalle. En la Figura 18 se muestra un esquema de la instalación física de la balanza en el túnel de viento. La balanza aerodinámica está posicionada de manera que el aire incide frontalmente en el modelo colocado en el túnel de viento. Al incidir el aire sobre él, se generan unas fuerzas que causan la deformación de la pletina integrada en el sistema. Esta deformación es fundamental para medir las fuerzas actuantes, pues se convierte en datos digitales mediante sensores específicos.

A continuación, se van a describir las partes fundamentales de la balanza aerodinámica que se ha diseñado en este trabajo para así comprender correctamente el funcionamiento de esta. En primer lugar, está formada por una pletina que es la parte de la balanza que se deforma debido a los esfuerzos producidos por el aire al incidir sobre el modelo. La deformación de la pletina está directamente relacionada con las fuerzas de arrastre que se generan. Por otro lado, el sensor instalado en la base de la balanza detecta la deformación y la convierte



en señales eléctricas que son enviadas al sistema de adquisición de datos. Este sensor es crucial para obtener mediciones precisas de la fuerza de arrastre ejercida sobre el modelo de ensayo. Por último, se encuentra el sistema de adquisición de datos basado en la plataforma de Arduino. El sistema de adquisición procesa las señales del sensor y las convierte en datos utilizables. Este sistema permite registrar las fuerzas de arrastre en tiempo real, proporcionando datos precisos para el objeto ensayado.

En la Figura 18 se muestra un esquema de la instalación de la balanza aerodinámica. El aire en movimiento incide frontalmente en el modelo, generando fuerzas que causan la deformación de la pletina. El sensor ubicado en la base de la balanza detecta la magnitud de la deformación producida por las fuerzas aerodinámicas. Estas señales se envían al sistema de adquisición de datos, donde se convierten en valores digitales que representan las fuerzas de arrastre. Por último, los datos procesados se visualizan en tiempo real en un Display y se almacenan para su posterior análisis. Esto permite una evaluación precisa del comportamiento aerodinámico del modelo.

En resumen, la instalación de la balanza aerodinámica en el túnel de viento es un proceso integral que involucra varios componentes trabajando juntos para medir con precisión las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre los modelos de ensayo. La correcta disposición del sistema y la adecuada calibración del sensor es esencial para obtener datos fiables y precisos, fundamentales para el análisis y el estudio de la aerodinámica en diferentes objetos.

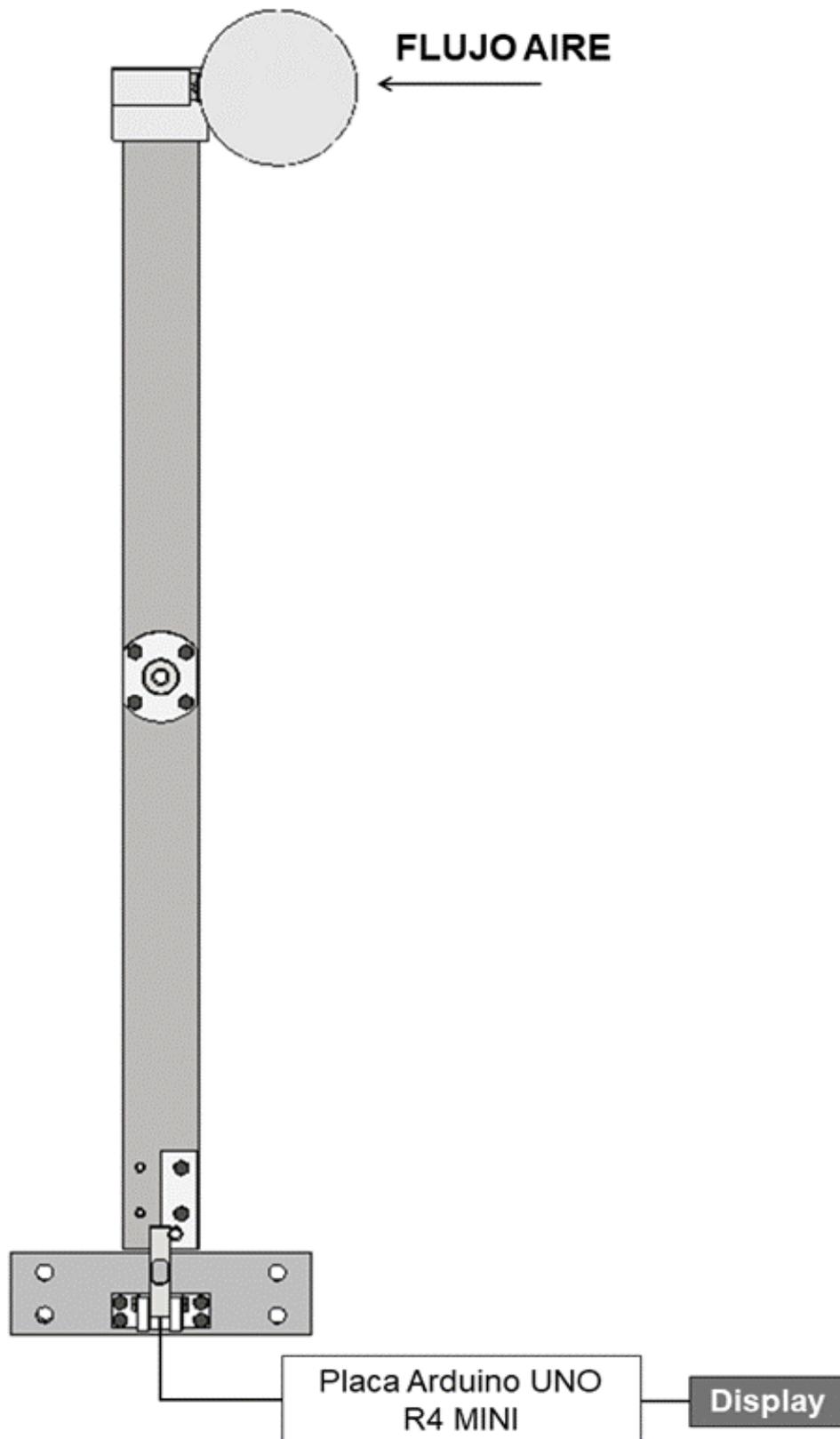


Figura 18. Esquema simplificado de la instalación de la balanza aerodinámica



7.3.- Condiciones del flujo para las diferentes geometrías de ensayo

A continuación, se procede al cálculo de los números adimensionales que fueron introducidos de forma teórica en el apartado 3.3.-, con el fin de determinar las condiciones del flujo para los diferentes modelos de ensayo.

7.3.1.-Número de Mach

Como se ha indicado en el apartado 7.1.- gracias a la capacidad de accionamiento a velocidad variable del ventilador instalado en el túnel de viento la velocidad será regulada hasta alcanzar los 40 m/s. Por tanto, para el cálculo del número de Mach, este se realiza con la velocidad máxima al ser la más desfavorable. De esta forma:

$$M = \frac{V}{a} = \frac{40}{330} = 0,121 \quad (7.3)$$

Para bajos números de Mach ($Ma < 0,3$) los efectos de compresibilidad en el caso de gases son insignificantes. Para este tipo de problemas, la similitud geométrica entre el modelo y el prototipo debe mantenerse.

7.3.2.-Número de Reynolds

Se tienen tres geometrías distintas: esfera, disco y coche. Cada una de ellas posee una longitud característica (L) distinta. Todas las longitudes fueron medidas en el laboratorio con la ayuda de un calibre. Por otro lado, los parámetros comunes, teniendo en cuenta que el medio fluido es aire, son los siguientes:

$$Re = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosidad}} = \frac{V\rho L}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (7.4)$$



Donde:

- ρ : densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- V : velocidad media del flujo $\left(\frac{m}{s}\right)$
- μ : viscosidad dinámica $\left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)$
- ν : viscosidad cinemática $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

En este caso el medio fluido es aire, por tanto:

$$\rho = 1,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right); \mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right); \nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \left(\frac{m^2}{s}\right)$$

Por otro lado, el ventilador va a ser accionado a diferentes frecuencias. Sin embargo, para los cálculos preliminares se empleará la velocidad mínima y máxima con el fin de determinar los rangos de valores en los que se moverá el número de Reynolds.

7.3.3.-Esfera

En la Figura 19 se muestra una modelización en Inventor de la geometría esférica. La longitud característica en este caso es su diámetro de 95 mm.



Figura 19. Longitud característica de la esfera modelada en Inventor

Por tanto, calculando el rango de valores que tomará el número de Reynolds en la realización de los ensayos experimentales:

$$Re_{min} = \frac{5,5 \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 1,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 0,095 (m)}{1,81 \cdot 10^{-5} \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)} = 34833,333 = 3,4 \cdot 10^4 \quad (7.5)$$

$$Re_{min} = \frac{35,5 \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 1,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 0,095 (m)}{1,81 \cdot 10^{-5} \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)} = 223566,667 = 2,24 \cdot 10^5 \quad (7.6)$$

7.3.4.-Disco

De igual forma, en la Figura 20 se observa una modelización en Inventor del disco, donde su longitud característica es su diámetro de 125 mm.

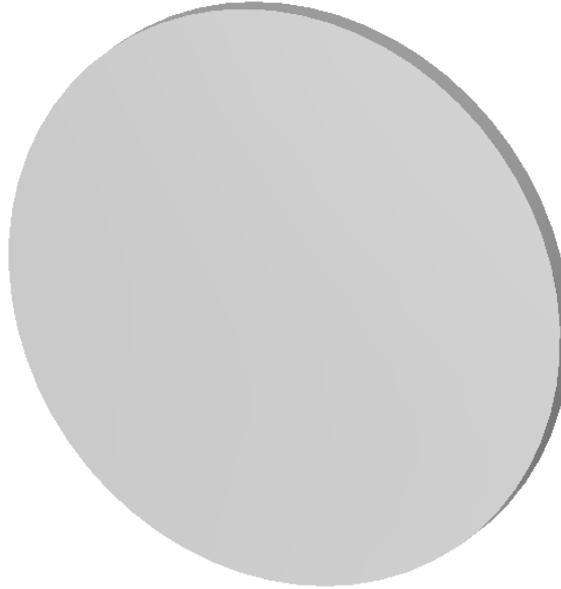


Figura 20. Disco modelado en Inventor

Por tanto:

$$Re_{min} = \frac{5,5 \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 1,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 0,125 (m)}{1,81 \cdot 10^{-5} \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)} = 45833,33 = 4,58 \cdot 10^4 \quad (7.7)$$

$$Re_{max} = \frac{35,5 \left(\frac{m}{s}\right) \cdot 1,2 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 0,125 (m)}{1,81 \cdot 10^{-5} \left(\frac{kg}{m \cdot s}\right)} = 295000 = 2,95 \cdot 10^5 \quad (7.8)$$

En la Tabla 1 se recogen los rangos del número de Reynolds que se van a alcanzar durante la realización de los ensayos experimentales. Como se puede comprobar, en todo caso estos valores varían en el orden de magnitud de entre 10^4 y 10^5 . Sin embargo, el número de Reynolds para el que se producirá la transición de régimen laminar a turbulento variará en función de las características de la geometría de ensayo en cada caso.



Geometría	Re_{min}	$Re_{máx}$
Esfera	$3,4 \cdot 10^4$	$2,24 \cdot 10^5$
Disco	$4,58 \cdot 10^4$	$2,95 \cdot 10^5$

Tabla 1. Rango de valores del número de Reynolds para las diferentes geometrías

7.3.5.-Justificación del diseño

El diseño de la balanza aerodinámica se llevó a cabo considerando múltiples factores que aseguran su precisión, funcionalidad y adecuación a las dimensiones del túnel de viento disponible. Este fue cuidadosamente planificado para maximizar la precisión de las mediciones y garantizar su compatibilidad con el túnel de viento. La elección de los componentes, tales como el rodamiento y el material de fabricación, así como las dimensiones específicas de la balanza, fueron decisiones fundamentadas en la necesidad de obtener datos fiables y reproducibles. Además, se debe realizar un diseño de apoyos adecuados para la galga extensiométrica de forma que se asegure que las deformaciones bajo carga sean precisas y consistentes. Estas consideraciones aseguran que la balanza pueda ser utilizada eficazmente en las pruebas aerodinámica para la determinación de las fuerzas de arrastre. A continuación, se detallan las razones clave detrás de las decisiones de diseño, incluyendo la elección de los componentes, dimensiones y especificaciones técnicas.

Material

La balanza fue fabricada en acero inoxidable debido a sus propiedades de resistencia a la corrosión, durabilidad y capacidad para soportar las condiciones de ensayo sin deformarse. Esto garantiza la estabilidad del instrumento y repetibilidad de las mediciones a lo largo del tiempo.

Dimensiones

Las dimensiones de la balanza fueron diseñadas en función de las dimensiones del túnel de viento para asegurar un ajuste adecuado y un funcionamiento óptimo. Se tomaron las siguientes consideraciones:



- Tamaño del modelo: la balanza debía ser lo suficientemente grande para soportar el modelo de ensayo, pero a su vez, lo suficientemente pequeña para caber en la sección de ensayo del túnel de viento. Esto garantiza que el modelo se encuentre completamente inmerso en el flujo de aire uniforme del túnel, evitando efectos de borde que puedan distorsionar las mediciones.
- Espacio para la instrumentación de medida: el diseño debía incluir espacio suficiente para la instalación de los cables de adquisición de datos que tenían que salir por la parte inferior del sensor de medida. Esto asegura que todas las partes del sistema estén totalmente integradas y protegidas contra posibles interferencias durante los ensayos.
- Proporciones y flujo de aire: las dimensiones se determinaron para minimizar su impacto en el flujo de aire dentro del túnel. Un diseño compacto y aerodinámico reduce las perturbaciones y asegura que el flujo alrededor del modelo sea representativo de las condiciones reales que se desean estudiar.
- Perfil de la barra: el perfil de la barra de soporte de la balanza fue diseñado para proporcionar suficiente rigidez y transmitir las fuerzas medidas con precisión. Sin embargo, también se tuvo en cuenta la necesidad de mantener un perfil delgado para minimizar la fuerza de arrastre que la propia barra pueda generar. Un perfil delgado reduce la resistencia adicional y evita que interfiera significativamente con las mediciones del modelo estudiado.

Rodamiento

Cabe destacar que se incorporó un rodamiento para minimizar la fricción y garantizar una alta precisión en la medición de las fuerzas aerodinámicas. La fricción en los puntos de apoyo puede introducir errores significativos en las mediciones, afectando a la exactitud de los resultados. El rodamiento permite un movimiento suave, reduciendo la resistencia mecánica.



Apoyos de la galga extensiométrica

El diseño de los apoyos de la galga extensiométrica es crucial para garantizar la deformación precisa y confiable bajo carga. Se implementaron dos tipos de apoyos:

- Apoyo fijo y rígido: se colocó un apoyo fijo y rígido en un lado de la galga extensiométrica para proporcionar una base estable y minimizar cualquier movimiento indeseado. Este apoyo asegura que la galga este bien sujeta y que cualquier fuerza aplicada resulte en una deformación medible y precisa.
- Apoyo flexible: en el otro lado de la galga se coloca un apoyo flexible. Este apoyo permite cierta libertad del movimiento, lo cual es esencial para que la galga se pueda deformar adecuadamente bajo la acción de las fuerzas aerodinámicas. La flexibilidad en el apoyo asegura que la galga registra correctamente las pequeñas deformaciones, proporcionando así datos precisos sobre las fuerzas de arrastre.

Este fue un punto que tuvo que ser modificado en el diseño de partida

7.3.6.-Justificación de la modificación en los apoyos de la galga extensiométrica

En el diseño inicial de la balanza aerodinámica, los apoyos superiores de la galga extensiométrica se habían concebido como fijos. Este diseño buscaba proporcionar una base estable para la galga, asegurando que cualquier fuerza aplicada resultara en una deformación precisa y medible. Sin embargo, durante la fase de calibración, surgieron problemas que llevaron a una reevaluación de esta decisión.

Una vez completada la verificación de las mediciones utilizando el sistema de calibración (detallado en el apartado 8.1.-), se observó un comportamiento anómalo en el sistema cuando se ejecutó el mismo código con el mecanismo de la balanza aerodinámica. Las mediciones no se estabilizan en un valor fijo como se esperaba; en cambio, mostraban una tendencia a descender indefinidamente.



Este problema sugería una inestabilidad en el sistema que debía ser abordada para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones de la balanza aerodinámica.

Para identificar la causa del problema, se descartó inicialmente la posibilidad de una fricción excesiva en el rodamiento colocado en la pletina. Se limpió el rodamiento para eliminar cualquier exceso de aceite que aumentara la fricción del mecanismo y tras comprobar que la respuesta del sistema de adquisición era la misma, se dirigió la atención hacia los apoyos de la galga extensiométrica. Se hipotetizó que estos apoyos fijos podrían estar restringiendo demasiado la galga, impidiendo la deformación adecuada bajo la acción de las fuerzas aerodinámicas. Para probar esta hipótesis, se realizaron una serie de pruebas:

En primer lugar, se evaluó la rigidez si la rigidez de los apoyos superiores impedía la correcta medición de las fuerzas. Se observó la respuesta de la galga bajo estas condiciones controladas para identificar cualquier restricción indebida en su deformación. Por último, se compararon los resultados con diferentes configuraciones de apoyo para determinar el impacto de la rigidez en las mediciones.

Las pruebas determinaron que los apoyos fijos (Figura 21) estaban causando el problema la galga extensiométrica no podía deformarse adecuadamente debido a la excesiva rigidez impuesta por los apoyos fijos, lo que resultaba en mediciones inestables y descendentes.

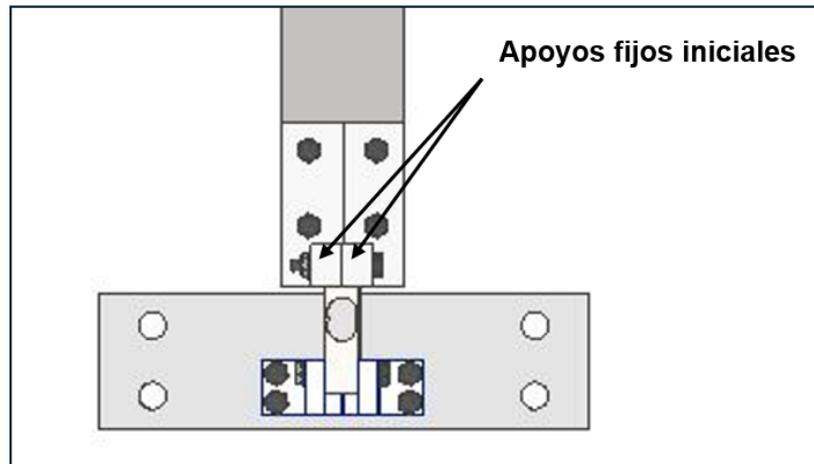


Figura 21. Apoyos fijos iniciales

Para resolver este problema, se diseñó unas piezas nuevas que proporcionaran un apoyo fijo y un apoyo flexible. Este nuevo diseño permite cierta libertad de movimiento en la galga, asegurando que pueda deformarse de forma controlada y precisa bajo la acción de las fuerzas aerodinámicas. Este ajuste facilita una estabilización adecuada de las mediciones, permitiendo que los valores tiendan a un punto fijo como es requerido para obtener datos fiables.

El nuevo diseño como se puede ver en la Figura 22, incluye:

- Un apoyo fijo y rígido: el cual mantiene un lado de la galga firmemente en su lugar proporcionando estabilidad.
- Un apoyo flexible: en la modelización de Inventor mostrado en la Figura 22 no se incluye, pero se decidió sujetar el apoyo fijo y rígido con una goma flexible como se puede ver en la para evitar el movimiento lateral de dicha pieza. Este apoyo permite deformaciones controladas.

Esta modificación ha demostrado ser efectiva para la resolución del problema inicial, mejorando significativamente la estabilidad y fiabilidad de las mediciones.

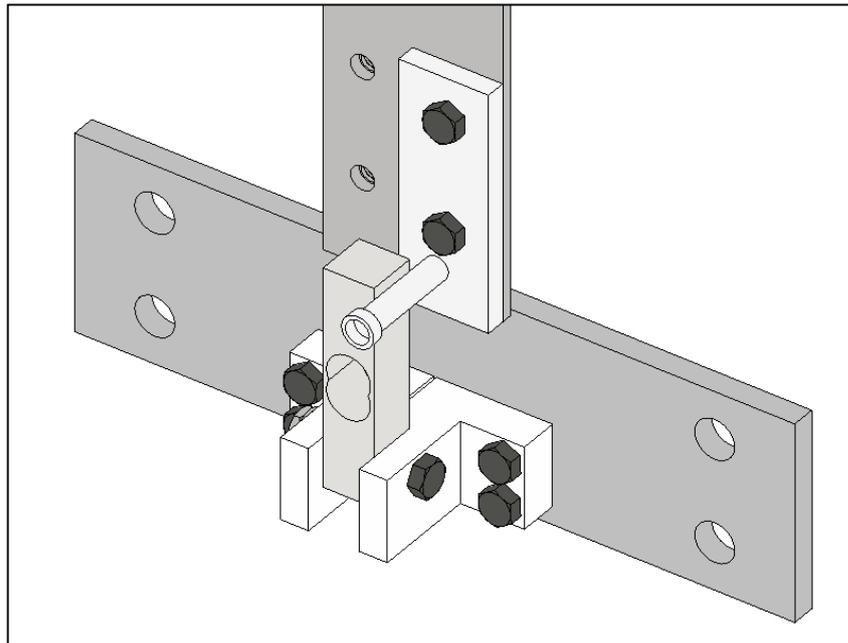


Figura 22. Modelización del ensamblaje modificado

7.4.- Diseño de la balanza

La balanza del túnel de viento debe cumplir con los criterios de metrología como cualquier otro instrumento de medición. Por tanto, se deben tener en cuenta una serie de restricciones técnicas en el diseño preliminar de la misma.

El diseño de la balanza aerodinámica se llevó a cabo en dos pasos principalmente. En primer lugar, fue necesario un análisis geométrico del túnel de viento descrito con anterioridad y, posteriormente, una vez decididas las dimensiones geométricas óptimas para la obtención de medidas lo más precisas posibles, se procedió al diseño de despiece que posteriormente da lugar a los planos de conjunto y despiece para su fabricación.



7.4.1.-Especificaciones técnicas

Las restricciones técnicas mencionadas anteriormente se relacionan con el proceso de fabricación de los componentes, el coste de compra de las piezas existentes en el mercado, así como la adaptación del túnel de viento existente (funcionalidad y ergonomía). En resumen, los criterios básicos de diseño son:

- Alta sensibilidad
- Reproducibilidad
- Baja histéresis
- Linealidad
- Coste/beneficio
- Funcionalidad
- Fabricación de los componentes
- Ergonomía
- Montaje

Por tanto, teniendo en cuenta las dimensiones del túnel de viento donde iba a ser instalada posteriormente, en la Figura 23 se representa un esquema de la colocación de la balanza aerodinámica en el túnel de viento. Se tuvieron en cuenta una de consideraciones para la realización de esta:

En primer lugar, se tomaron medidas de las dimensiones de la tobera con el objetivo de centrar la colocación de la balanza. Por otro lado, cabe destacar que se partió de una pletina con una longitud inicial de 1 m, si bien es cierto que teniendo en cuenta que la célula de carga se encuentra colocada en la parte inferior de la balanza aerodinámica, interesa que la pletina sea lo más larga posible con el objetivo de obtener una mayor deformación de la barra y, con ello, mayor momento flector y mejores mediciones. El objetivo se basó en situar el modelo lo más centrado posible en la tobera para que el flujo incidente en el mismo sea lo más uniforme posible. Por otro lado, en el medio de la pletina se encuentra insertado un rodamiento a modo de sujeción de la balanza, impidiendo la rotación de esta. Fue por tanto condición indispensable que este mecanismo quedara ubicado en el área



de la tobera. Como consecuencia, se decidió que la longitud óptima para el largo de la pletina era de 700 mm.

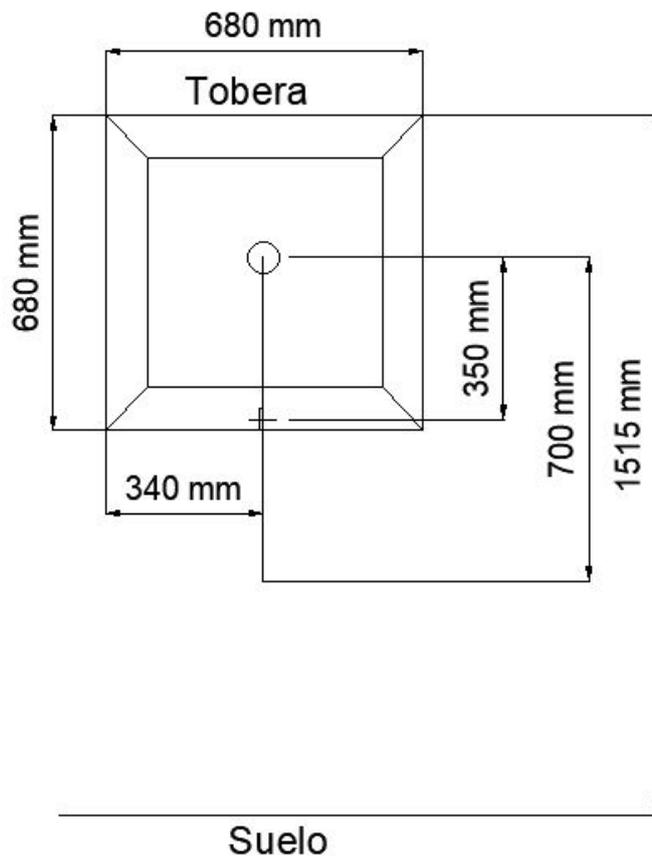


Figura 23. Esquema de colocación de la balanza aerodinámica en el túnel de viento

7.4.2.-Diseño de los componentes individuales

El diseño de las piezas individuales se llevó a cabo mediante herramientas de Dibujo Asistido por Computador, más concretamente en Autodesk Inventor. Como se verá posteriormente, todos los componentes fueron realizados a partir de procesos de mecanizado, siendo un proceso de fabricación con unos costes asociados elevados. Sin embargo, el uso de esta herramienta de dibujo permite no solo el diseño en 3D de las piezas, sino también un ensamblaje de estas, permitiendo así localizar errores y mejoras en el diseño antes de la fabricación de los componentes, por lo que el riesgo de desechar un componente por alguna de



estas razones desaparece. Una vez realizado el diseño de los componentes se procede al ensamblaje de estos.

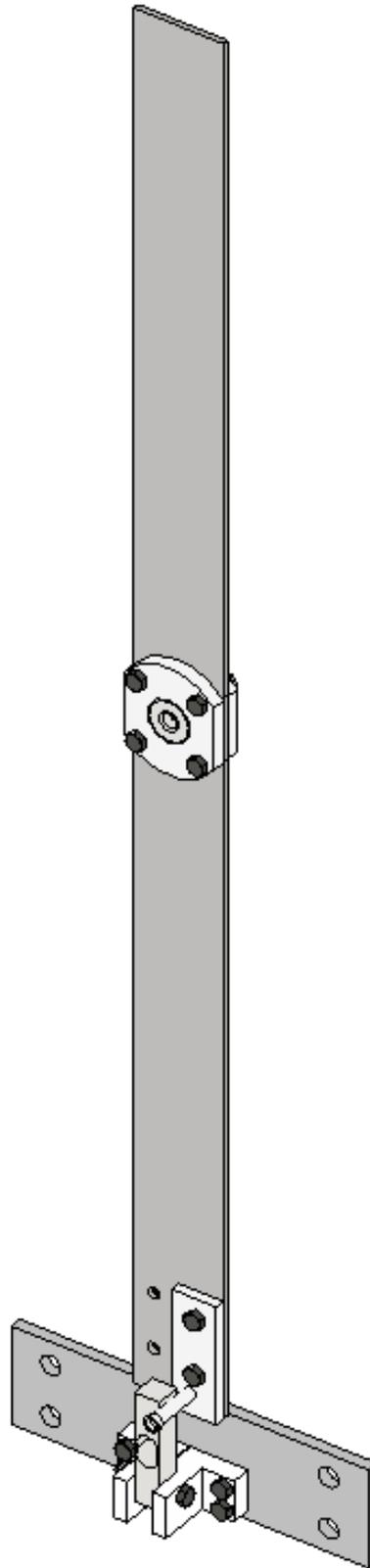


Figura 24. Ensamblaje de la balanza en Inventor



Una vez que se ha realizado el ensamblaje (Figura 24) se procede a la realización de los planos de conjunto y despiece. Estos planos se encuentran recogidos en el Anexo (14.1.-).

7.5.- Fabricación de la balanza

El diseño de los componentes individuales se llevó a cabo mediante procesos de mecanizado por arranque de viruta. La construcción del prototipo de balanza aerodinámica se realizó partiendo de los planos de diseño de esta, adjuntados en el apartado 14.1.- . Los materiales empleados para la fabricación de los componentes fueron los siguientes:

- La posición 1 se corresponde con una pletina de acero inoxidable.
- Las posiciones 3,4,5,7 y 8 se fabricaron en aluminio.
- La posición 13 se corresponde con la placa de sujeción fabricada en acero inoxidable.

Por otro lado, la posición 6 se corresponde con la célula de carga, que constituye el elemento de medida esencial de la balanza como se ha comentado con anterioridad. El resto de las posiciones son elementos comerciales normalizados (tornillos, tuercas, arandelas y rodamientos de bolas) y no son objeto de fabricación.

A continuación, se detalla el proceso de fabricación y montaje del prototipo.

7.5.1.-Procesos de fabricación

Los procesos de fabricación irán detallados según la posición de los componentes.



Posición 1:

Se trata del brazo palanca de la balanza, y para su construcción se ha partido de una pletina comercial de 700 x 45 x 3 mm sobre la cual se han marcado los centros de los agujeros de acuerdo con el plano n° 1, utilizando las siguientes herramientas:

- Una punta trazadora
- Granete
- Regla
- Mármol de trazado
- Gramil

Una vez graneteados los centros se ha procedido a realizar el taladrado de estos en taladro vertical de columna, con brocas de los diámetros respectivos (6 y 10 mm).

Posición 2:

Se trata del rodamiento rígido de bolas que provoca el giro del brazo palanca y, por ser un elemento normalizado, se ha adquirido comercialmente. Se requieren 2 unidades (*ref.: Z809S*).

Posición 3:

Se trata del soporte de rodamiento, constituido por dos unidades iguales dispuestas a ambos lados del brazo palanca, según se indica en el plano de conjunto. Estos elementos se construyeron con un cilindro de aluminio de diámetro 60 mm y 30 mm de longitud, sometido a operaciones de refrentado, cilindrado (diámetro 56), taladrado central, cilindrado interior (diámetro 22) y tronzado (espesor 7 mm), repitiendo el proceso para la 2ª unidad.



Seguidamente se han sometido ambas piezas a un proceso de fresado para formar las caras planas, utilizando una fresa frontal.

Finalmente se han taladrado los 4 agujeros de diámetro 5 mm, una vez marcados los centros con ayuda de gramil y mármol de trazar.

Posiciones 4 y 5:

Se trata del soporte de fijación de la célula de carga al brazo de palanca, constituido por dos piezas simétricas según se definen en los planos 4 y 5. La fabricación de cada pieza se realizó a partir de un prisma de aluminio de 60 x 25 x 30 mm que se mecaniza en fresadora, usando fresa de diámetro 10 mm hasta los vaciados con las dimensiones previstas.

Seguidamente se han obtenido los centros de los agujeros empleando mármol de trazado y gramil, para proceder al taladrado de estos en taladro de columna.

Posiciones 7 y 8:

Se trata del soporte de fijación de la célula de carga con la placa de fijación, constituido por dos piezas simétricas tal y como se definen en los planos 7 y 8. La fabricación de cada pieza se hizo a partir de un prisma de aluminio de 36 x 25 x 30 mm que se mecaniza en fresadora, usando fresa de diámetro 10 mm hasta los vaciados con las dimensiones previstas.

Seguidamente se han obtenido los centros de los agujeros empleando mármol de trazado y gramil, para proceder al taladrado de estos en taladro de columna.



Posición 13:

Constituye la placa de sujeción, realizada en acero inoxidable. Dicha placa ha sido construida a partir de una pletina de 50 x 10 mm y longitud 180 mm. Sobre ella se han marcado los centros de los agujeros con ayuda de mármol de trazado y gramil y se ha procedido a su taladrado y posterior roscado con machos M5, los correspondientes.

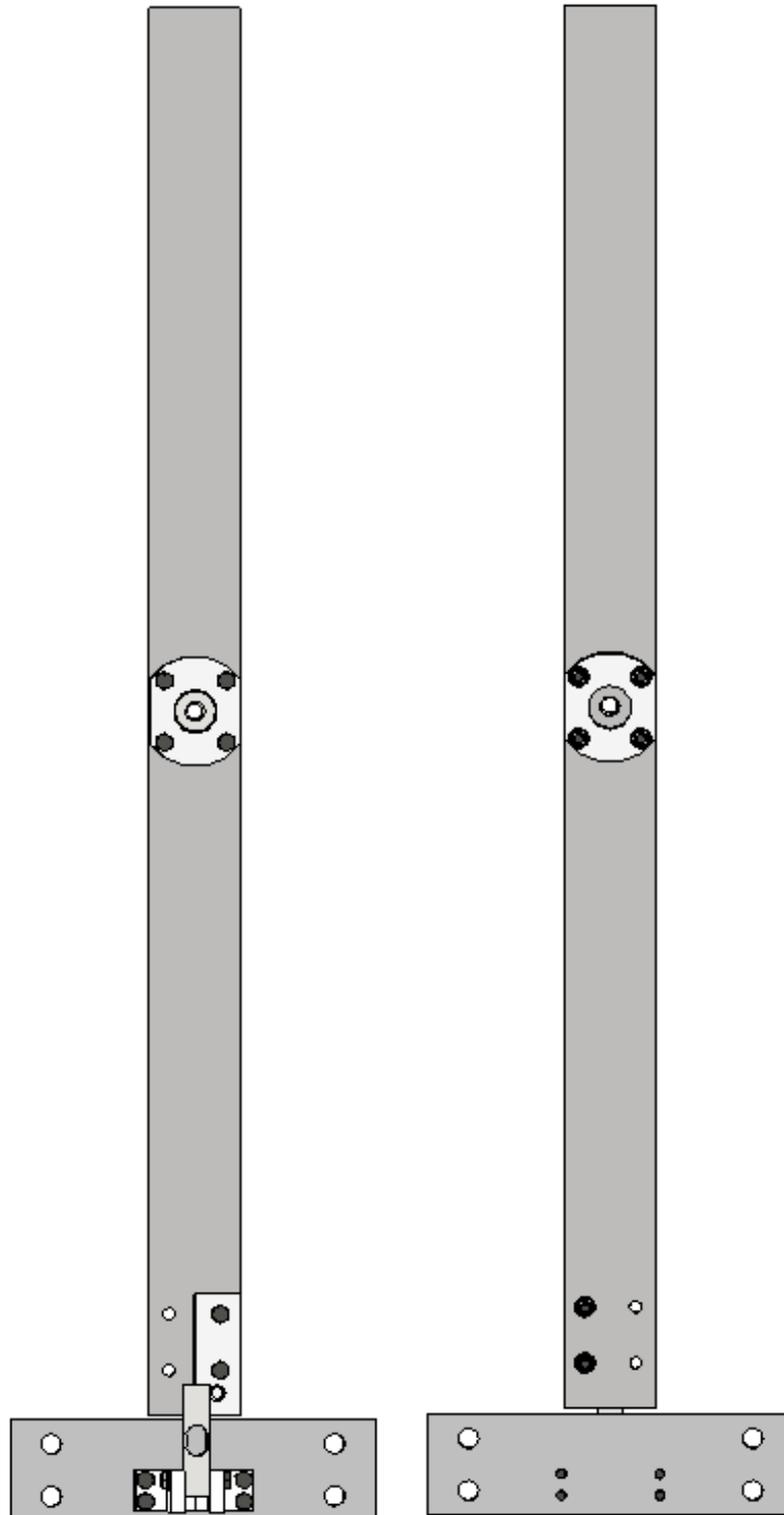


Figura 25. Vistas del ensamble final de la balanza



7.5.2.-Ensamblaje de los componentes

Construidos los componentes anteriores y dispuestos los elementos normalizados se ha procedido al montaje del conjunto, por el siguiente orden:

- Montaje de soportes (Posición 3) sobre el brazo palanca (Posición 1).
- Montaje de rodamientos (Posición 2) en soportes (Posición 3).
- Premontaje sin apriete de soportes de la célula de carga (Posición 4 y 5) sobre el brazo palanca (Posición 1).
- Premontaje sin apriete de soportes de la célula de carga (Posición 7 y 8) sobre la placa de fijación (Posición 13).
- Fijación de la célula de carga (Posición 6) a los soportes (Posición 4 y 5) y (Posición 7 y 8).
- Ajuste final y apriete de los soportes de la célula de carga (Posición 4 y 5) sobre el brazo palanca (Posición 1).
- Ajuste final y apriete de los soportes de la célula de carga (Posición 7 y 8) sobre la placa de sujeción (Posición 13).



7.6.- Diseño del gemelo digital

Un gemelo digital es una representación virtual de un objeto o un sistema que refleja su ciclo de vida completo. Este modelo se actualiza en tiempo real utilizando datos obtenidos del sistema real y aplica simulación, machine learning y razonamiento para ayudar a la toma de decisiones.

Al crear un modelo virtual del sistema antes de realizar la conexión física de los componentes electrónicos, se obtiene una comprensión más clara del problema planteado. Esto permite detectar errores en el diseño o configuración antes de dar paso a los ensayos experimentales.

El gemelo digital permite realizar pruebas y simulaciones virtuales, lo que facilita la identificación de posibles problemas antes de la realización de los ensayos. Así, se pueden ajustar y optimizar parámetros en el entorno virtual, ahorrando tiempo y recursos al reducir la necesidad de prototipos físicos.

Al disminuir la necesidad de crear múltiples prototipos físicos se reducen los costos de materiales y tiempos de fabricación. Por otro lado, permite supervisar en tiempo real el rendimiento de la balanza aerodinámica, así como las condiciones experimentales, ayudando a detectar y resolver problemas rápidamente.

Además, analiza el estado de los componentes y determina la probabilidad de fallos, facilitando un mantenimiento preventivo más eficiente.

En este proyecto específico se utilizó Python para diseñar el gemelo digital. La balanza aerodinámica está equipada con un sensor, la galga extensiométrica, que mide las fuerzas ejercidas por el fluido sobre la geometría ensayada.

La implementación del gemelo digital comenzó con la creación de una interfaz gráfica, como se muestra en la Figura 26. Esta interfaz incluye diferentes botones y ventanas para interactuar con el sistema, lo que permite una gestión más intuitiva y efectiva del proceso experimental y de simulación.

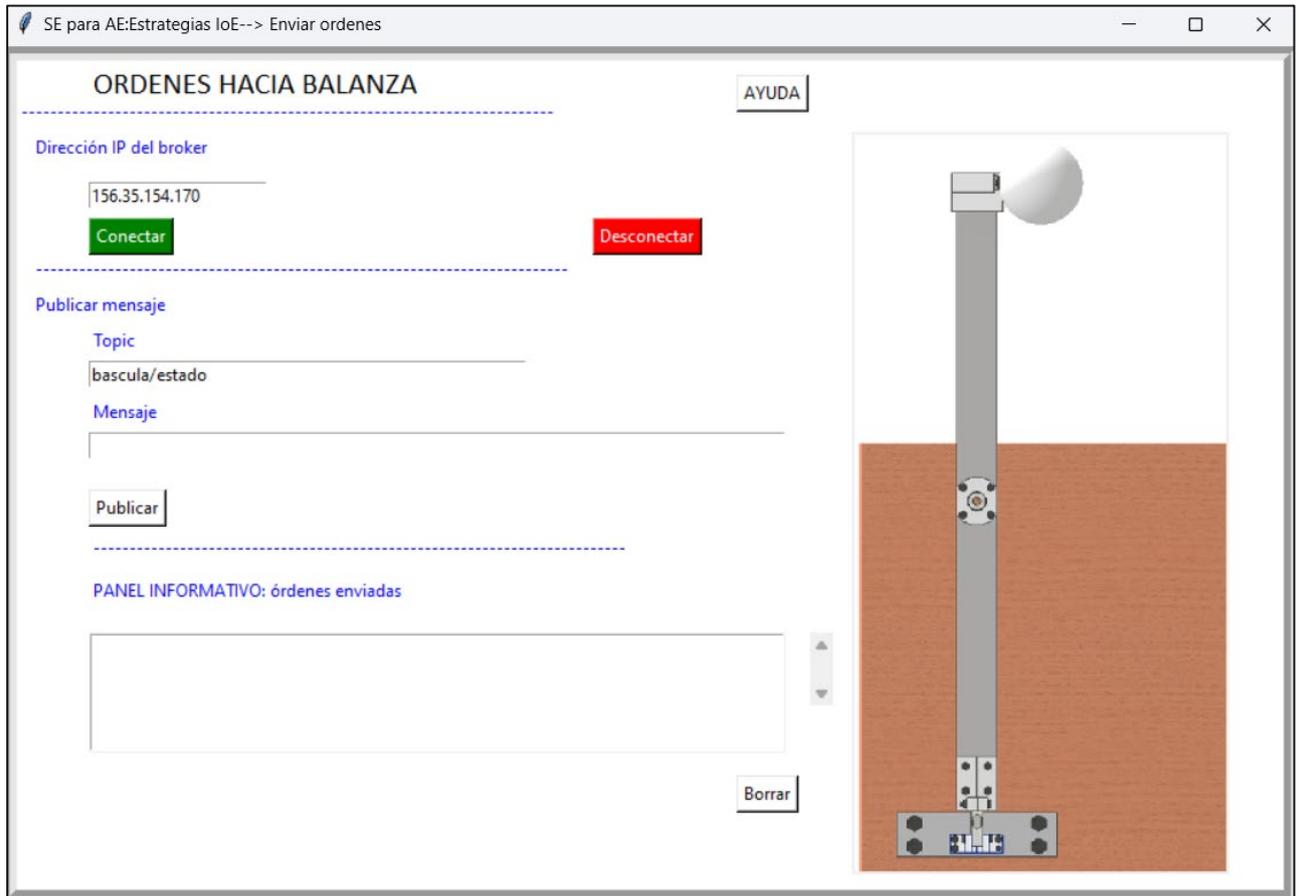


Figura 26. Gemelo digital de la balanza aerodinámica

Como se ha comentado previamente, el desarrollo del gemelo digital es un componente crucial en la evolución y mejora del sistema de adquisición de datos de la balanza aerodinámica.

Para verificar la conectividad y capacidad de comunicación del sistema, se realizaron pruebas utilizando la aplicación “IoT MQTT Panel”. Esta aplicación facilita la supervisión y control de la balanza aerodinámica desde el dispositivo móvil personal, permitiendo interactuar con el sistema de forma remota.

En primer lugar, se estableció la conexión al broker MQTT, que actúa como intermedio para el envío y recepción de mensajes entre la balanza aerodinámica y el dispositivo móvil.



Posteriormente se enviaron y recibieron mensajes entre la balanza y la aplicación, asegurando la correcta transmisión de datos. Además, se verificó que el estado de la balanza pudiera ser controlado desde la aplicación.

El objetivo final del gemelo digital es mucho más amplio que las pruebas iniciales. Está diseñado para recoger y procesar las medidas en tiempo real proporcionadas por el sensor de la balanza. Por tanto, permitirá:

Por un lado, la visualización remota de las medidas será desde cualquier lugar, facilitando el monitoreo continuo en tiempo real.

Por otro, el mando de órdenes al sistema pues los usuarios podrán enviar órdenes al sistema basándose en los datos recibidos.

A pesar de que en el presente trabajo se ha logrado llevar a cabo su diseño, dado el corto periodo de tiempo que implica la realización de este trabajo Fin de Máster, la complejidad de alcanzar el objetivo final para el que es implementado un gemelo digital, su implementación para el control automático del sistema queda como una tarea para proyectos futuros.

7.7.- Diseño del sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos es una parte fundamental de la balanza aerodinámica, ya que permite recoger, procesar y analizar las mediciones necesarias para evaluar las fuerzas de arrastre en diferentes objetos sometidos a un flujo de aire incidente. Este sistema debe ser preciso, confiable y capaz de manejar grandes cantidades de datos en tiempo real. En primer lugar, se comentará el conexionado del circuito electrónico para posteriormente dar paso a la explicación del código de programación de la placa Arduino.



7.7.1.-Conexión del circuito electrónico

Los componentes del circuito, así como su conexión, se pueden observar en el esquema de la Figura 27.

Se comentarán en líneas generales, a excepción de la célula de carga y el amplificador, dada la importancia de estos elementos para obtener un sistema de adquisición de datos con la suficiente precisión. Estos son los siguientes:

Componente	Función
Placa Arduino UNO R4 Mínima	Núcleo del sistema de adquisición. Encargado de procesar las señales y ejecutar el código de control.
Display OLED I2C	Mostrar la información relevante en tiempo real, como instrucciones y resultados de mediciones.
Célula de carga	Sensor que mide las fuerzas de arrastre aplicadas sobre la superficie de los objetos de estudio.
Amplificador HX-711	Aumenta la señal de la célula de carga para que pueda ser procesada por el Arduino.
Cable de datos USB	Conectar la placa Arduino al ordenador para cargar el código y realizar la comunicación de los datos.
Cables DUPONT	Realizar las conexiones entre los diferentes
Resistencias 10 kΩ	Asegurar niveles de voltaje adecuados.
Pulsadores	Realizar operaciones como la tara y el cálculo de la media de las medidas instantáneas recogidas por el sensor en un intervalo de tiempo deseado por el
Placa de pruebas sin soldadura	Facilitar el montaje y prueba del circuito sin necesidad de soldar componentes.

Tabla 2. Componentes del circuito electrónico y su función



En la Figura 27 se muestra el esquema de la instalación física de los componentes electrónicos. Este esquema sirve como base para el posterior diseño de la placa de circuito integrado.

7.7.2.-Programación de la placa Arduino

La programación de la placa Arduino se realizó teniendo en cuenta el fin educativo de esta balanza aerodinámica. El código completo se encuentra recogido en el Anexo (14.2.-) y para ello se empleó la documentación recogida en el libro de proyectos de Arduino (Fitzgerald & Shiloh, 2016) . El objetivo principal y final es la medición de las fuerzas de arrastre en las sesiones de prácticas de laboratorio de la asignatura de Mecánica de Fluidos. Por tanto, el software debe guiar a los alumnos durante las mediciones.

La estructura del código es la siguiente:

Inicialización del sistema:

- Configuración de los pines de entrada y salida.
- Inicialización del Display OLED para mostrar la información.
- Configuración del amplificador HX-711 para la célula de carga.

Bucle principal (loop):

- Indicación de instrucciones: el Display OLED se configura para mostrar las instrucciones paso a paso, guiando a los alumnos.
- Contadores: se utilizan contadores para mostrar el tiempo restante en cada paso.
- Lectura de datos: el Arduino lee continuamente los datos de la célula de carga a través del amplificador HX-711.
- Tara: los pulsadores permiten realizar la tara para eliminar el peso inicial y medir únicamente las fuerzas de arrastre.



- Cálculo de medias: los pulsadores, a su vez, permiten calcular la media de las medidas instantáneas en un momento determinado.
- Botón de reset: permite reiniciar el sistema para comenzar una nueva medición.

Detalles de implementación:

Por un lado, las instrucciones se muestran en el Display OLED, así como el estado del sistema en cada momento. Esto incluye mensajes como “Coloque el objeto en la balanza”, “Realizando medición” y “Tiempo restante: X segundos”.

Por otro lado, los pulsadores permiten a los alumnos realizar la tara para justar el sistema a cero antes de la medición y calcular la media para obtener un valor preciso. El código además incluye funciones de verificación para asegurar que los datos leídos por la célula de carga son consistentes y se encuentran dentro de los rangos esperados, aumentando así la fiabilidad del sistema.

Por tanto, el sistema de adquisición de datos diseñado para la balanza aerodinámica es robusto y educativo, permitiendo a los alumnos realizar mediciones precisas y seguir instrucciones claras durante la realización de los ensayos experimentales. La combinación de un hardware bien seleccionado y un software orientado a la enseñanza asegura que los objetivos educativos y de medición se cumplan de forma eficiente.



7.7.3.-Amplificador HX-711

El amplificador HX711 es un convertidor analógico a digital de precisión de 24 bits (ADC), diseñado para básculas de pesaje y aplicaciones de control industrial al interactuar directamente con un sensor puente.

El módulo HX711 es un transmisor entre la célula de carga y el microcontrolador Arduino, de forma que permite la lectura del peso en la celda de forma sencilla. Es compatible con las células de carga de 5 kg, 20 kg y 50 kg. Además, posee internamente la lectura necesaria del puente de Wheatstone formado por la celda de carga y un conversor ADC de 24 bits. La comunicación con el microcontrolador se realiza por medio de un protocolo tipo serial mediante 2 pines (Clock & Data) (AVIA, 2024).

7.7.4.-Célula de carga

Para las mediciones en la balanza se necesita una célula de carga, que es un transductor de fuerza que transforma una magnitud física en una señal eléctrica. Se utiliza tanto en balanzas comerciales como en soluciones de pesaje industrial aplicadas en automatización y control de procesos industriales e investigaciones. El principio de funcionamiento de las células de carga se basa en la variación de resistencia óhmica de un sensor llamado galga extensiométrica cuando se somete a una deformación.

Las deformaciones por fatiga se generan en componentes y subsistemas debido al peso, vibraciones o fuerzas de desplazamiento. Uno de los métodos más comunes para la realización de las mediciones es a través del uso de galgas extensométricas metálicas o “extensómetros”. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de resistencia que se produce cuando un conductor es sometido a una tensión o esfuerzo de compresión. Las galgas extensométricas pegadas a lo largo de la balanza tienen la característica de variar su resistencia en función de la presión que se aplique sobre ellas. La disposición de estas se realiza



en forma de puente de Wheatstone, pues permite medir las diferencias mínimas de potencial generadas. El diseño de la báscula implica determinar las constantes elásticas de la célula de carga para obtener la mayor sensibilidad y una primera frecuencia natural adecuada a las frecuencias encontradas durante los ensayos posteriores en el túnel de viento. En la Figura 27 se muestra la célula de carga con la que se ha realizado la balanza aerodinámica. Las galgas extensiométricas se encuentran pegadas a una pieza metálica (aluminio, acero aleado o acero inoxidable), denominada cuerpo de la célula de carga y totalmente integrada en su deformación. Para una fuerza aplicada en el centro del eje éste es necesario que permanezca indeformable con respecto a la célula de carga, que a su vez debe deformarse una cantidad suficiente para que se produzca variación de la resistencia de los extensómetros. Por tanto, para obtener una adecuada sensibilidad se busca una célula de carga con la mayor sensibilidad posible, pues la fuerza actúa sobre el cuerpo de la célula de carga y su deformación será transmitida a los extensómetros, que a su vez medirán la intensidad (Sorte, Gabaldo, & Dutra, 2017).

7.8.- Diseño de la placa de circuito impreso

Para mejorar la organización y reducir la cantidad de claves en el circuito electrónico se decidió diseñar y fabricar una placa de circuito impreso (PCB). Este diseño no solo facilita la conexión de componentes electrónicos, sino que también hace que el sistema sea más compacto y ordenado.

El diseño de la placa de circuito impreso parte del esquema de conexionado de los componentes electrónicos, mostrado en la Figura 27. Este esquema es esencial porque define cómo se conectarán todos los componentes electrónicos en la PCB. El diseño y la fabricación de la PCB se delegaron al Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Comunicaciones y Sistemas. Este departamento se encargó de convertir el esquema del circuito en un diseño de PCB, que posteriormente sería fabricado.

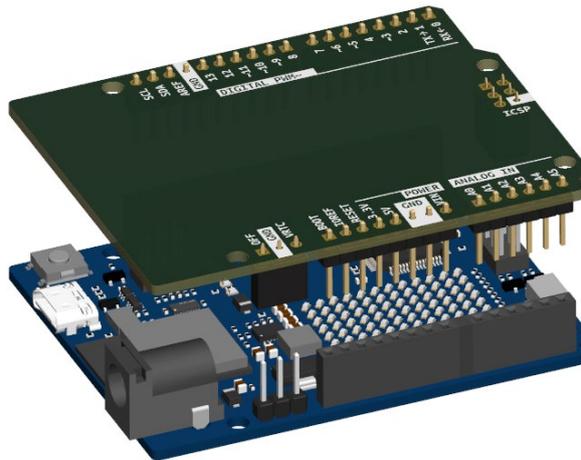


Figura 28. Placa de circuito impreso (PCB)

Una vez que la PCB fue fabricada se realizó su taladrado en los puntos necesarios para la inserción de los componentes electrónicos y los pines de la placa Arduino. Este paso es crucial para asegurar que los componentes se pueden montar y soldar correctamente en la placa. Posteriormente, se realizó la soldadura de los pines necesarios para la conexión con la placa Arduino y las resistencias pull-up en cada pulsador. Estas resistencias son necesarias para asegurar que los pulsadores funcionen correctamente, manteniendo las líneas de entrada en un estado definido cuando los pulsadores no están presionados.

En la Figura 29 se muestra la PCB completamente ensamblada con todos los componentes necesarios soldados. Esta PCB se insertó en la placa Arduino funcionando como una unidad compacta y ordenada, cumpliendo así el objetivo inicial del diseño.



Figura 29. Placa de circuito impreso conectada a la placa Arduino



8. RESULTADOS

Una vez explicadas las consideraciones previas, así como la fabricación e instrumentación de la balanza aerodinámica, se exponen los resultados de los ensayos experimentales realizados.

8.1.- Calibración

Antes de instalar la balanza en el túnel de viento y proceder a su calibración in situ, se debe asegurar que todos los componentes electrónicos están correctamente conectados y la lectura de la célula de carga es precisa. Para ello, se utiliza el código de programación con un mecanismo de calibración específico.

La calibración es uno de los puntos clave, ya que una mala calibración conllevaría a errores en los resultados obtenidos de los ensayos. Una buena calibración de la balanza permite obtener resultados precisos, pudiendo predecir de forma correcta todos los fenómenos existentes en una situación real extrapolable por semejanza. Por tanto, se ha de diseñar un procedimiento de calibración en el que se puedan establecer relaciones entre la señal eléctrica emitida por las células de carga y la fuerza ejercida sobre el modelo, así como entre los mecanismos que permiten obtener dichas relaciones y los valores de los coeficientes de calibración que determinan las relaciones mencionadas. Si los resultados coinciden con los esperados o son muy próximos se puede determinar el nivel de precisión de la balanza.

El mecanismo diseñado se muestra en la Figura 30. Este incluye un disco de acero inoxidable con un peso conocido, que sirve como soporte para los diferentes pesos de tarado. Se añade una base del mismo material para minimizar las vibraciones que podrían afectar a la precisión de la célula de carga.

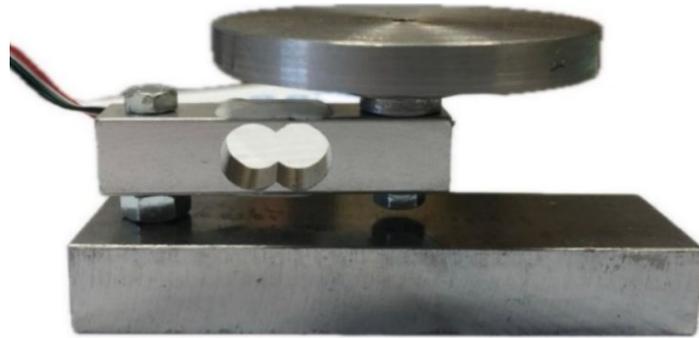


Figura 30. Mecanismo de calibración de la balanza

Este mecanismo permite verificar que la célula de carga y el sistema electrónico pueden medir el peso de manera precisa.

Por tanto, se escribe un código en el entorno de desarrollo de Arduino (IDE). Se coloca un peso conocido sobre el disco de forma que el software descuenta el peso propio del mismo y el Display muestra únicamente el peso adicional.

A través del Display se van mostrando diferentes mensajes que orientan al usuario sobre lo que está haciendo el programa y en qué momento puede colocar el peso sobre el disco.

En primer lugar, fue necesario implementar una serie de librerías que permiten diversas funciones de control y comunicación entre sensores:

- “HX711.h”: para permitir la comunicación con el sensor de peso HX711.
- “LiquidCrystal_I2C.h”: para permitir controlar la pantalla LCD a través de una interfaz I2C.
- “Wire.h”: necesaria para la comunicación I2C.

Una vez ejecutado el software de la balanza aerodinámica, se verificó que las medidas obtenidas oscilaban alrededor del valor esperado con un margen de error de aproximadamente ± 1 g, lo cual es aceptable dadas las condiciones del ensayo experimental.



Para llevar a cabo la calibración in situ de la balanza aerodinámica, se diseñó un mecanismo específico que permitió la colocación precisa de los pesos de calibración. Este diseño es crucial para asegurar la precisión y repetibilidad de las mediciones. El mecanismo de calibración, tal y como se puede ver en la Figura 31, consta de los siguientes componentes:

En primer lugar, se colocó un perfil de aluminio de 30 x 30 mm al que se le realizó un agujero con el fin de albergar el tornillo que soporta la polea. En dicho agujero se introduce un tornillo que sustenta el mecanismo de polea.

Esta polea asegura que el peso se aplica de manera directa y vertical, minimizando cualquier fricción o desviación que podría afectar a la medición. Los pesos conocidos, seleccionados para determinar la pendiente de calibración, fueron de 100 y 1000 gramos. Interesa escoger unos pesos lo más dispares posibles para obtener así una mayor precisión en las medidas y que, a su vez, proporcionen facilidad de manejo.

Estos pesos se cuelgan mediante un hilo resistente que se engancha a la pletina de la balanza y se apoyan en el centro de la polea. Este hilo es esencial para transmitir el peso de la balanza de forma precisa.

Por último, al tornillo se le añadió una pieza de plástico para albergar su cabeza hexagonal.

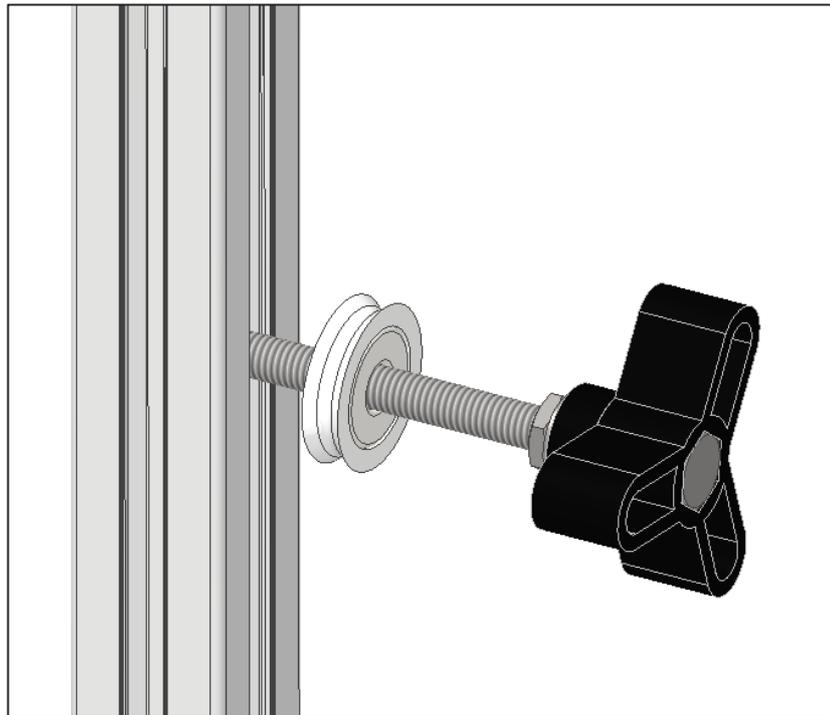


Figura 31. Mecanismo de polea para la calibración de la balanza.

En la Figura 32 se muestra una vista general del mecanismo de calibración empleado.

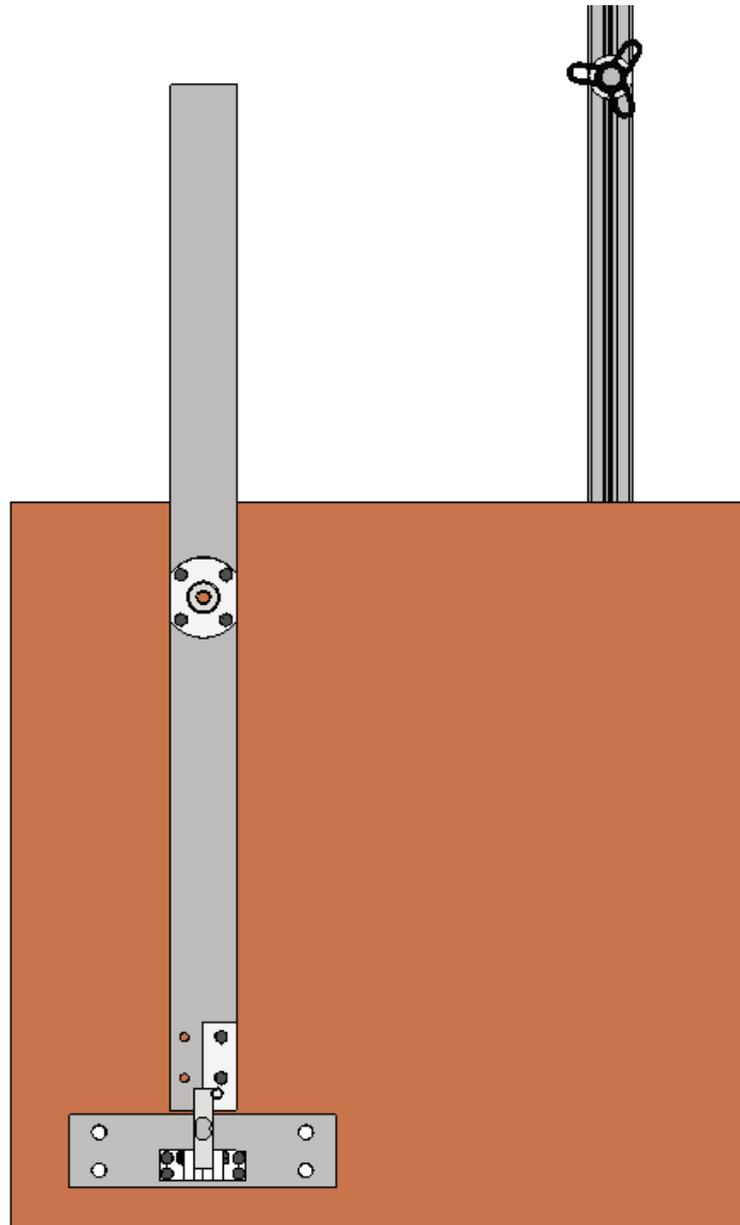


Figura 32. Vista general del modelo mecanismo de calibración

Una vez comentado el diseño del sistema, el proceso de calibración se desarrolla de la siguiente manera:

En primer lugar, el código de Arduino realiza el tarado automático de la balanza, ajustándola a cero para eliminar cualquier peso residual. Posteriormente, dicho software guía al usuario a través del Display indicando cuándo y cómo colocar



los diferentes pesos. Siguiendo estas instrucciones, se cuelgan los pesos conocidos en el extremo del hilo que pasa por la polea. Como el mecanismo tiene un fin educativo, se inicializa un contador inverso de 10 segundos en la colocación de cada peso que se va mostrando en pantalla, para dar así tiempo suficiente a los alumnos a realizar la colocación. Las lecturas van siendo registradas en cada peso colocado. Estas lecturas se utilizan para calcular la pendiente de calibración mencionada previamente, lo que es crucial para convertir las señales registradas por la galga extensiométrica en las unidades de peso deseadas (en este caso, gramos).

Con las lecturas obtenidas y teniendo en cuenta que el código de Arduino fue programado para calcular internamente la pendiente, esta queda determinada a partir de la expresión (11.1). Durante la calibración se colocan los dos pesos conocidos y Arduino registra las señales de salida correspondientes a estos pesos, que en (11.1) se denominan $Valor_{1000g}$ y $Valor_{100g}$ respectivamente. Este valor de la pendiente permite determinar el peso aplicado en función de la señal de salida.

$$Pendiente = \frac{(1000 - 100)g}{Valor_{1000g} - Valor_{100g}} = \frac{900 g}{Valor_{1000g} - Valor_{100g}} \quad (11.1)$$

Por tanto, este procedimiento supone una etapa fundamental para asegurar la exactitud de los resultados experimentales y para validar el correcto funcionamiento del sistema de medición. De esta forma se garantiza que la balanza aerodinámica esté calibrada correctamente y que las mediciones obtenidas sean precisas y confiables. En la Figura 33 y la Figura 34 se muestra el procedimiento de calibración descrito anteriormente con el peso de 100 y 1000 g.



Figura 33. Calibración con el peso de 100 g



Figura 34. Calibración de la balanza con el peso de 1000 g

8.2.- Ensayos experimentales

Para verificar la fiabilidad de las medidas obtenidas con la balanza aerodinámica se realizaron ensayos con la geometría esférica (Figura 19). La elección de realizar los primeros ensayos con esta geometría se debe a la



disponibilidad de bibliografía existente, la cual facilita la comparación con los resultados experimentales. En particular, se utilizó la gráfica del efecto de la rugosidad superficial en el coeficiente de arrastre de una esfera en función del número de Reynolds, extraída de (Young, Munson, & Okiishi, 2001).

La gráfica original muestra diferentes curvas que representan el coeficiente de arrastre para esferas con distintas rugosidades superficiales. Dado que la rugosidad superficial de la esfera utilizada en el ensayo no se puede medir con precisión, se decidió digitalizar únicamente las curvas correspondientes a la rugosidad máxima (“Golf ball”) y mínima (“smooth”). Esta digitalización se realizó en AutoCAD, permitiendo crear un rango de referencia para comparar los resultados experimentales.

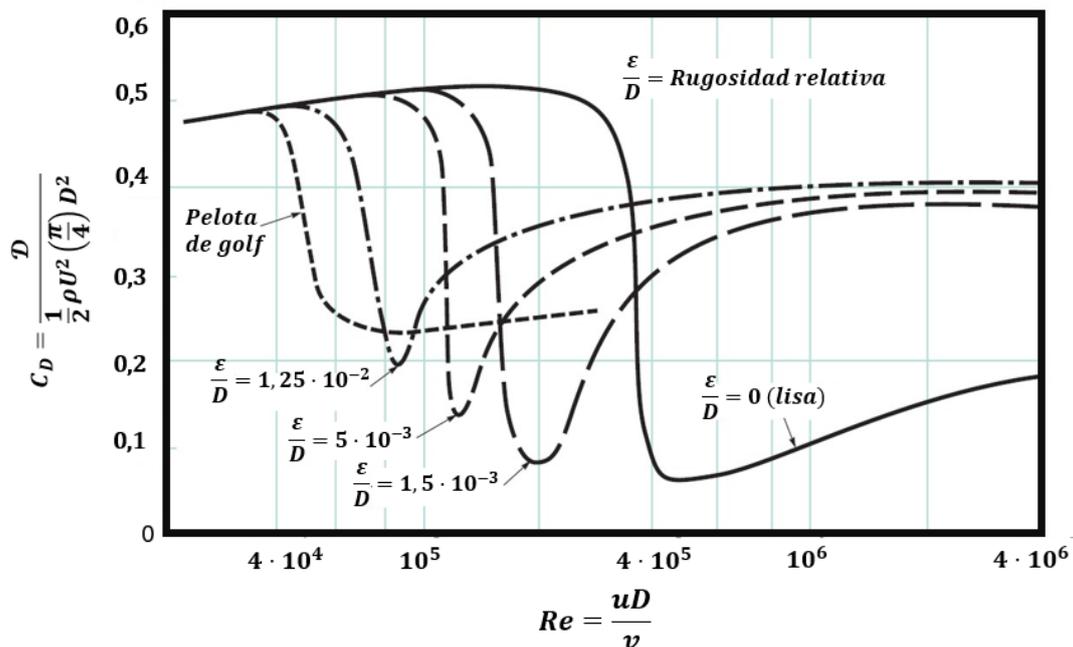


Figura 35. Efecto de la rugosidad superficial en el coeficiente de arrastre de una esfera en función del número de Reynolds (Young, Munson, & Okiishi, 2001)

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones:

En primer lugar, la frecuencia del túnel de viento se incrementó en pasos de 2 Hz, desde 8 Hz hasta 50 Hz. en cada caso, se registró la velocidad del aire en el



túnel. Esta velocidad se utilizó para calcular el número de Reynolds según la expresión (3.19).

A su vez, en la pantalla del Display se mostraba la fuerza incidente sobre la geometría en gramos. De esta forma, a través de la expresión (11.3) se determina la fuerza ejercida en cada caso en Newtons:

$$Fuerza (N) = \frac{Medida (gramos)}{1000 \text{ gramos}} \cdot 1 (kg) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) \quad (11.3)$$

Con las fuerzas medidas y el número de Reynolds calculado, se utilizó la expresión (3.24) para determinar el coeficiente de arrastre de la esfera en cada caso.

En la Figura 36 se muestra una modelización en Inventor del ensayo experimental de la balanza aerodinámica tanto de la geometría esférica como con el disco.

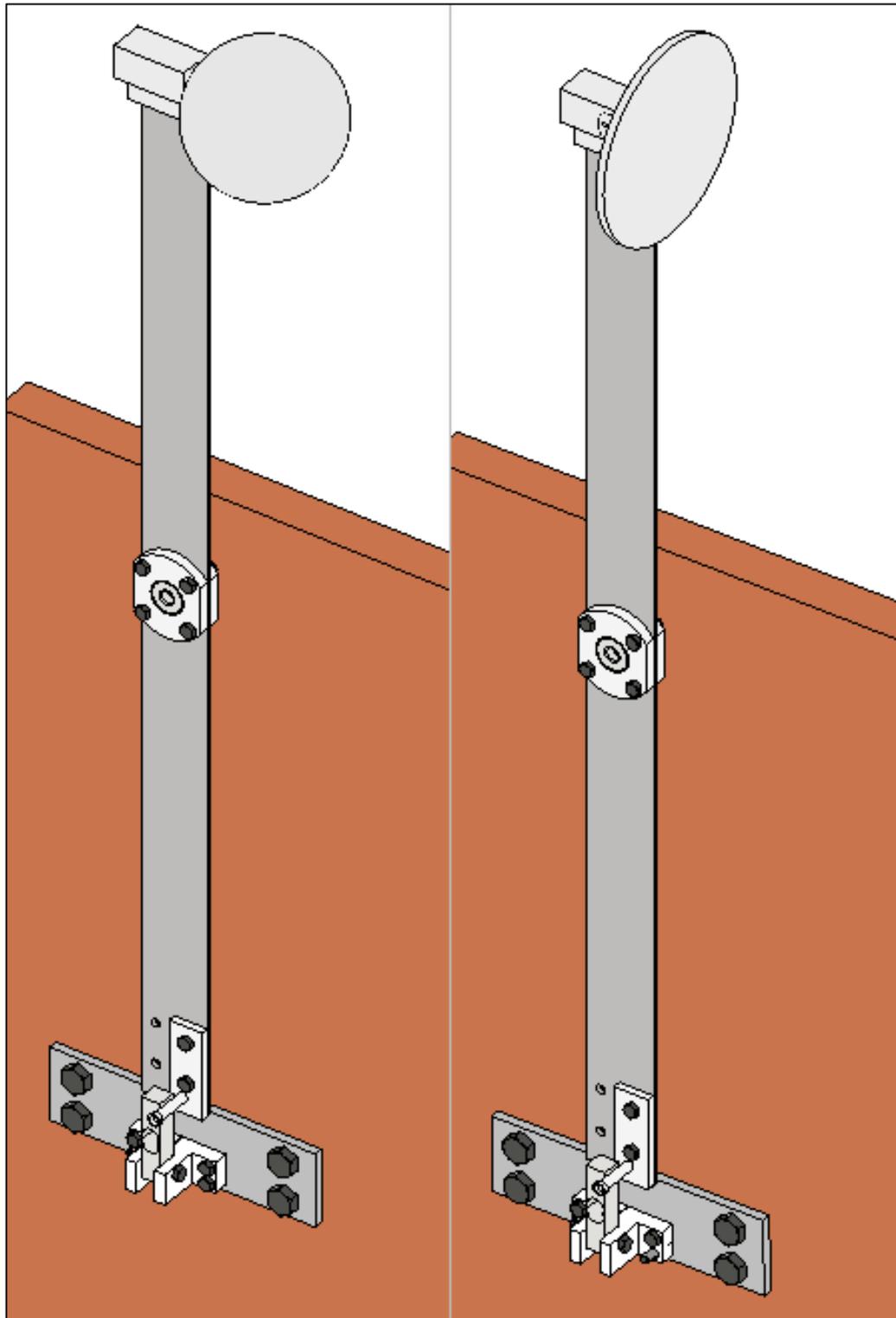


Figura 36. Modelización en Inventor del ensayo de la balanza aerodinámica con las diferentes geometrías: esfera y disco



8.1.- Rangos de medición de la balanza

El rango de medición de la balanza se ve restringido por la frecuencia de accionamiento del ventilador del túnel de viento. En este caso, como se ha comentado previamente, la frecuencia mínima es de 8 Hz, por lo que no es posible llegar a medir coeficientes de arrastre a números de Reynolds inferiores a $3,4 \cdot 10^4$. De la misma forma, la frecuencia máxima alcanzable es de 50 Hz, así que no es posible medir coeficientes de arrastre a números de Reynolds por encima de $22,4 \cdot 10^5$.

En la Figura 37 se representan gráficamente los coeficientes de arrastre obtenidos en función del número de Reynolds en el caso de la geometría esférica. Las líneas continuas corresponden a las curvas digitalizadas de (Young, Munson, & Okiishi, 2001).

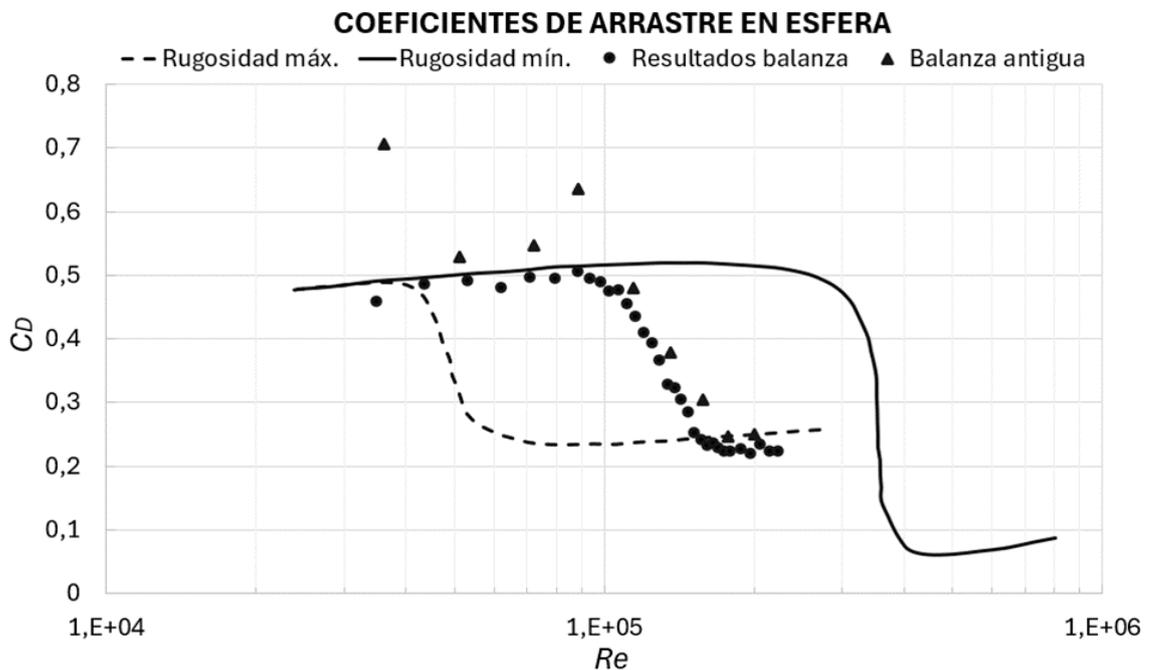


Figura 37. Coeficientes de arrastre de la geometría esférica en función del número de Reynolds



En el eje horizontal se representa el número de Reynolds el cual, como se ha comentado previamente, es un parámetro adimensional que caracteriza el flujo del fluido. Por otro lado, en el eje vertical se representa el coeficiente de arrastre (C_D) que mide la resistencia que ofrece la esfera al movimiento a través del fluido.

Los resultados experimentales obtenidos con la nueva balanza aerodinámica (Resultados balanza) se compararon con los valores de referencia digitalizados (Rugosidad máxima y Rugosidad cero). Por otro lado, se incluyeron mediante puntos grises los resultados de las mediciones con la balanza antigua.

Los resultados obtenidos con la balanza antigua presentan mayor dispersión, y están ubicados mayoritariamente en un rango de C_D más alto. La balanza nueva proporciona unos resultados con menor dispersión, acercándose más a los valores teóricos, particularmente en el rango de Re entre 10^4 y 10^5 .

Por otro lado, se puede observar cómo los puntos obtenidos con la nueva balanza se alinean mejor con las curvas teóricas, especialmente en el rango de transición donde el C_D disminuye bruscamente. Los puntos obtenidos con la balanza antigua no siguen tan de cerca la tendencia teórica y presentan una mayor variabilidad. Por tanto, a partir de los resultados obtenidos se concluye que con la nueva balanza se obtienen valores más consistentes que se ajustan mejor a los valores esperados, mostrando una mayor fiabilidad y precisión.

La Figura 38 muestra la relación entre el coeficiente de arrastre (C_D) en función del número de Reynolds (Re) en el caso del disco. En el eje horizontal se representa el número de Reynolds, que varía en una escala logarítmica desde $1 \cdot 10^4$ hasta $1 \cdot 10^6$. En el eje vertical se muestra el coeficiente de arrastre (C_D) que varía desde 0,01 hasta 100, también en escala logarítmica. Los puntos negros se corresponden con los datos obtenidos con la balanza antigua, mientras que los puntos verdes hacen referencia a los resultados obtenidos con la diseñada en este trabajo. Por otro lado, la línea continua naranja se corresponde con los datos experimentales tomados de la literatura (Young, Munson, & Okiishi, 2001).

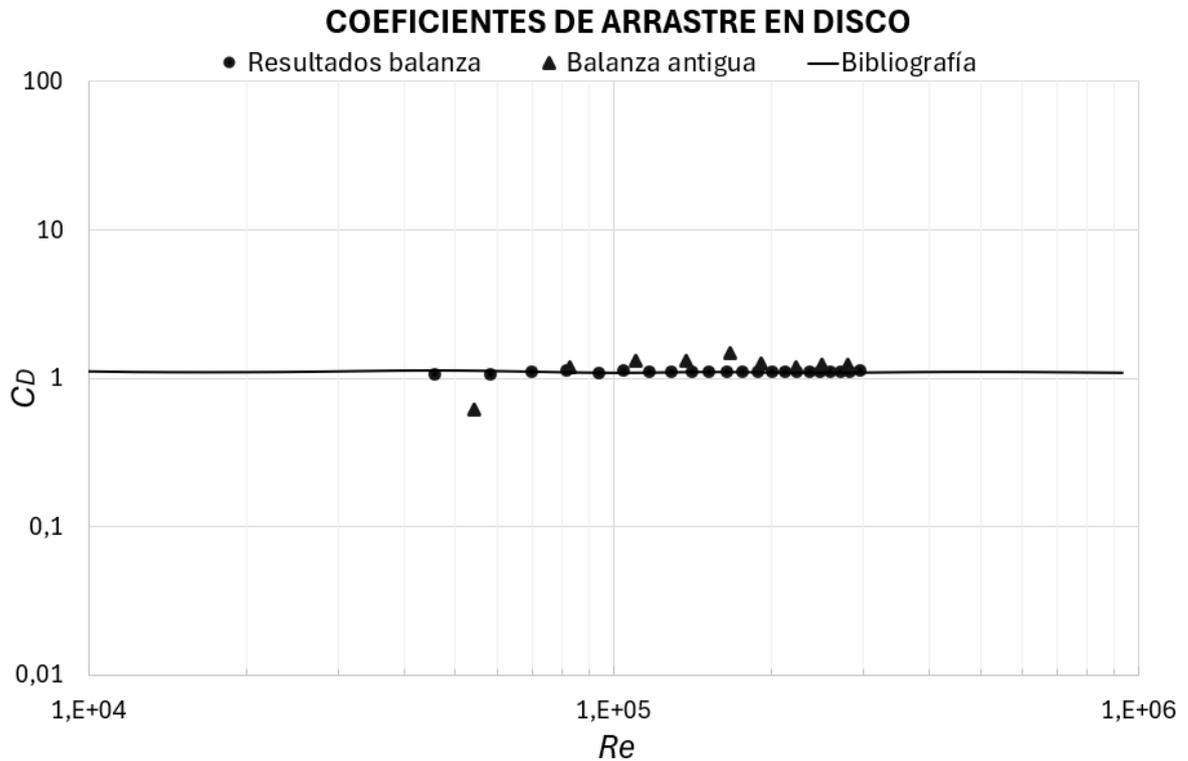


Figura 38. Coeficientes de arrastre de la geometría de disco en función del número de Reynolds.

La curva extraída de la bibliografía proporciona una referencia experimental bien establecida, por lo que la proximidad de los datos valida la precisión de las mediciones realizadas. Es evidente que los datos obtenidos con la nueva balanza muestran una mayor precisión y consistencia con los valores teóricos de la bibliografía, ya que se ajustan mejor a la línea constante de $C_D \approx 1,1$. Los resultados de las mediciones obtenidos con la balanza antigua presentan una mayor dispersión, indicando una menor precisión y fiabilidad.

Por tanto, las mediciones obtenidas con la nueva balanza muestran una mejora significativa en la precisión y consistencia en comparación con la balanza antigua. La balanza desarrollada en este trabajo produce resultados que se ajustan mejor a los valores experimentales extraídos de la bibliografía, lo que sugiere que es una herramienta más confiable para la medición del coeficiente de arrastre tanto en la geometría esférica como en el disco en todo el rango de medición. La menor



dispersión de los datos confirma su superioridad en términos de precisión y exactitud.

El uso de la nueva balanza para medir el coeficiente de arrastre C_D en discos y esferas ha permitido validar su precisión y confiabilidad. Por un lado, se han realizado las mediciones con el disco y la esfera debido a que existen curvas experimentales bien establecidas del coeficiente en función del número de Reynolds, que sirven como referencia para comparar las mediciones experimentales. Esto permitió determinar un excelente grado de ajuste de las mediciones realizadas, confirmando que el diseño de la nueva balanza es capaz de proporcionar mediciones precisas y confiables debido a una menor dispersión y una alineación correcta con la curva extraída de (Young, Munson, & Okiishi, 2001).



9. INCERTIDUMBRE EXPERIMENTAL

Todo ensayo experimental dónde se efectúen mediciones, debe ser analizado desde el punto de vista de la influencia de los errores que se pueden cometer en los resultados finales. Esto es lo que se conoce como “evaluación de la incertidumbre de los resultados”. El procedimiento de evaluación seguido se describe a continuación

El objetivo de un análisis de incertidumbre es fijar el intervalo de confianza de las medidas experimentales; esto es, estimar el error cometido a lo largo de la cadena de medida. La definición estadística sería: el radio del intervalo que estima el error. Esta estimación tendrá un cierto grado de fiabilidad o probabilidad. Para expresar correctamente la incertidumbre, se debe indicar, pues, la probabilidad de que el valor real esté comprendido entre los límites de incertidumbre.

En primer lugar, conviene recordar dos conceptos relevantes en la instrumentación como son la repetitividad, o capacidad de obtención de la misma medida en condiciones idénticas de ejecución del ensayo; la diferencia entre el valor medido y el real es lo que se conoce como error. Como la magnitud de este error es desconocida, se debe estimar. Esta estimación es lo que se conoce como incertidumbre, un análisis de incertidumbre será correcto si se consigue englobar el error dentro del valor estimado.

El análisis de incertidumbre se realiza debido a que los datos obtenidos experimentalmente no se corresponden exactamente con los valores reales. La precisión de la instrumentación, las técnicas de medida y procesamiento de los datos, y la posible impericia personal son las causas de esta falta de correspondencia. Un ensayo experimental no podrá ser considera como bueno si la incertidumbre (correctamente calculada) no se encuentra dentro del rango buscado. Existen una serie de técnicas para asegurar, en la medida de lo posible, que el análisis de incertidumbre esté correctamente realizado.

En este caso, en las medidas realizadas, no se puede garantizar la repetitividad absoluta debido a la inherente turbulencia caótica del flujo. Por tanto,



aunque los aparatos empleados tuviesen unas respuestas ideales, las medidas fluctuarían a lo largo del tiempo. Además, el sistema de medición presenta unas propias incertidumbres, que depende de sus características, de principios de funcionamiento y calidad de sus componentes, y en ningún caso podrán ser despreciados.

En numerosas situaciones, las magnitudes medidas se utilizan para determinar a posteriori otras variables. Suele ser habitual la obtención de una variable de forma indirecta, a partir de la estimación de otra magnitud física y una posterior “propagación” de esos resultados de forma analítica. (Blanco Marigorta & Ballesteros Tajadura, Análisis de incertidumbre en mecánica de fluidos, 1994).

Por tanto, llamando M a la medida, U a la incertidumbre y P a la probabilidad, la expresión:

$$M \pm U (P = 95\%) \quad (12.1)$$

Lo que quiere decir que el valor correcto estará comprendido entre los valores

$$M + U \text{ y } M - U \quad (12.2)$$

con una probabilidad del 95%.

9.1.- Fuentes de incertidumbre

A continuación, se exponen la lista de fuentes de incertidumbre presentes en el presente proyecto:

En primer lugar, está la incertidumbre propia del fenómeno. La turbulencia es considerada, como es habitual, una incertidumbre de las variables medias, aunque su concepto es mucho más extenso. A menudo se producen fluctuaciones del flujo o inestabilidades locales y/o momentáneas inevitables en un trabajo experimental que provocan la dispersión de las medidas.

Además, se tiene una incertidumbre asociada a la precisión de las herramientas con las que fue fabricada la balanza aerodinámica. Sin embargo,



dada la poca importancia de este aspecto en el ensayo que se está evaluando, estas no se van a tener cuenta.

Se tendrán en cuenta las fuentes de incertidumbre que forman el sistema de adquisición de datos. Estas son las siguientes:

- Célula de carga: se tendrá en cuenta la precisión y el rango de medida.
- Amplificador: tanto la precisión como la linealidad.
- Placa Arduino: resolución del ADC (convertidor del analógico-digital) así como el ruido del sistema.

Los componentes que dan lugar al sistema de adquisición proporcionan una incertidumbre en las medidas debida a su propia precisión, más o menos constante que se denomina incertidumbre sistemática, U_s .

Por otro lado, se pueden cometer posibles errores en el proceso de medición que origina una incertidumbre de precisión denominada U_p .

La incertidumbre total debida a ambos factores es la incertidumbre total del proceso de medida que viene dada por:

$$U = \sqrt{U_s^2 + U_p^2} \quad (12.3)$$

Por último, hay que destacar que, si se relacionan entre sí distintas medidas realizadas con sus respectivas incertidumbres, la incertidumbre final resulta ser una combinación de las de origen, cuyo valor puede ser significativamente mayor.

9.2.- Evaluación de la incertidumbre

Para evaluar la incertidumbre de una medida se emplean métodos de valoración estadísticos.

Dada una muestra de valores correspondientes a una magnitud, el valor de la medida se puede estimar como una medida aritmética de los valores registrados, es decir:



$$M = \bar{y} = \frac{1}{N} \sum y_i \quad (12.4)$$

El error promedio de las medidas se estima mediante la desviación estándar de la muestra, cuyo valor es:

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (12.5)$$

Y la incertidumbre de la medición realizada viene dada por:

$$U = t_\alpha \cdot \frac{S_y}{\sqrt{N}} \quad (12.6)$$

Donde:

- M es el valor estimado de la magnitud medida
- N es el n° de registros de la muestra
- y_i es cada uno de los valores medidos
- t_α es el percentil de probabilidad de la t de Student con $n-1$ grados de libertad.
- U es la incertidumbre de la medida

Según lo anterior, cualquier medida realizada queda comprendida dentro del intervalo: $y \in [M - U; M + U]$ (ec. 12.2) con una probabilidad de $(1 - \alpha)$.

9.3.- Incertidumbre de los componentes electrónicos

La incertidumbre de los componentes que forman el sistema de adquisición de datos viene dada por los datos de fabricante.

Una información completa debería proporcionar el tamaño de la muestra de calibración (N), la desviación estándar S_y o la varianza de esta y el nivel de confianza o probabilidad con la que fue realizada (t_α). La incertidumbre de calibración sería:



$$U_c = t_\alpha \cdot \frac{S_y}{\sqrt{N}} \quad (12.7)$$

En muchos casos, los fabricantes dan la precisión de los aparatos en forma de % sobre la lectura o % sobre el fondo de escala, siendo:

$$\text{Precisión} = \pm U_c$$

En los aparatos de medida que se utilizaron en este trabajo, se puede considerar despreciable el error sistemático de los mismos, por lo que la incertidumbre será asociada al error de calibración.

Se consideran nulas las incertidumbres de las magnitudes geométricas al ser de valor conocido y constante.

9.4.- Incertidumbre de una medición

Cuando se mide una magnitud constante, se pueden tomar una o varias lecturas de esta. El valor a considerar y su incertidumbre viene dados por:

$$M = \bar{y} = \frac{1}{Z} \sum y_i \quad (12.8)$$

$$U_m = \frac{U_c}{\sqrt{Z}} \quad (12.9)$$

Siendo:

- M es el valor de la medida
- U_m es la incertidumbre de la medida
- U_c es la incertidumbre de calibración del aparato
- Z el nº de valores registrados

Según lo anterior, la incertidumbre del aparato puede disminuir incrementando el nº de medidas. Cuando una magnitud fluctúa, se añade una nueva incertidumbre. Asumiendo que esas fluctuaciones forman parte del error, la repetición de medidas permite calcular la incertidumbre de precisión a partir de la varianza de calibración,



empleando la *t* de Student, pero en este caso el resultado incluirá la incertidumbre del apartado más la del fenómeno:

$$M = \bar{y} = \frac{1}{Z} \sum y_i \quad (12.10)$$

$$U_m = t_\alpha \cdot \frac{S_y}{\sqrt{Z}} \quad (12.11)$$

Donde:

- M es el valor estimado de la magnitud medida
- Z es el nº de registros de la muestra
- y_i es cada uno de los valores medidos
- S_y es la desviación estándar de la muestra de calibración
- t_α es el percentil de probabilidad de la *t* de Student con $n-1$ grados de libertad
- U_m es la incertidumbre de la medida

9.5.- Combinación de incertidumbres

Si en una medición intervienen varias fuentes de incertidumbre conocidas e independientes entre sí, la incertidumbre total de la medida viene dada por:

$$U_T = \sqrt{\sum U_i^2} \quad (12.12)$$

En las mediciones del ensayo se produce combinación de incertidumbre cuando se combinan aparatos de medida para obtener una magnitud.

9.6.- Propagación de resultados

En la mayoría de los experimentos, las magnitudes medidas se utilizan para calcular otras variables. Los resultados finales tendrán un grado de fiabilidad dependiente de la incertidumbre de las medidas y los cálculos realizados. El



proceso de cálculo de la incertidumbre del resultado es lo que se denomina propagación.

Para calcular la incertidumbre en estos casos se aplica la expresión de Kline & McClintock (1953) y Kline (1985):

$$U_R = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial R}{\partial y_i} \cdot U_i \right)^2} \quad (12.13)$$

Las variables que intervienen en el cálculo de los coeficientes adimensionales característicos de la balanza se obtienen de forma indirecta a partir de las magnitudes medidas. La propagación de las respectivas incertidumbres está relacionada con las expresiones matemáticas que las ligan.

Para disminuir el error en la variabilidad de las medidas durante una etapa crucial como es el proceso de calibración, se implementó una estrategia específica en el software de adquisición de datos. Durante la calibración el objetivo es establecer un valor de referencia preciso y confiable para cada peso conocido utilizado en las pruebas. Para lograrlo, se programó el código para tomar un número significativo de medidas y calcular un promedio. Esto se debe a que la toma de múltiples medidas y su posterior promediado ayuda a reducir el impacto de cualquier anomalía o fluctuación momentánea en las lecturas.

En concreto, el software se configuró para tomar 200 medidas durante cada paso del proceso de calibración. Esta cantidad elevada de muestras asegura que se captura una presentación precisa del peso real, minimizando la influencia de cualquier ruido o interferencia momentánea que pueda afectar a una sola medición. Una vez que se toman las 200 medidas, se calcula el promedio de estas. El promedio es entonces utilizado como el valor de referencia para el peso conocido. Este método estadístico de promediado es fundamental porque reduce el error aleatorio y mejora la exactitud de la medida final, suavizando desviaciones extremas debido a causas aleatorias.



Estas variaciones pueden ser causadas por fluctuaciones en la señal, ruido electrónico o incluso pequeñas vibraciones en el entorno. Por tanto, se obtuvieron valores estables y representativos que mejoran significativamente la precisión del sistema de adquisición de datos.

9.6.1.-Incertidumbre de cada componente

- Celda de carga: la celda de carga tiene una incertidumbre de $\pm 0,05\%$ de su fondo de escala (Electronica, 2024). En este caso se trabaja con una celda de 5 kg por lo que el valor de la incertidumbre es de:

$$U_{célula} = 0,05 \cdot 5000 = 2,5 \text{ g}$$

- Amplificador HX711: La resolución del HX711 puede ser hasta 24 bits, pero generalmente se considera una resolución efectiva menor. Supongamos una resolución efectiva de 16 bits sobre una escala de 5 kg:

$$U_{amplificador} = \frac{5000 \text{ g}}{2^{16}} = 0,076 \text{ g}$$

- ADC de la placa Arduino: La resolución del ADC es de 10 bits y su rango de tensión de entrada es de 0-5V. sin embargo, la mayor parte de la incertidumbre en este caso provendrá del ruido del sistema, que se encuentra entorno a 5 mV. Por tanto, la incertidumbre es de: (Arduino, 2024)

$$U_{Arduino} = 5 \text{ mV}$$

En término de gramos:

$$U_{Arduino} = 5 \text{ mV} \cdot 0,1 \frac{\text{g}}{\text{mV}} = 0,5 \text{ g}$$



- Incertidumbre por el promedio de medidas: se están tomando y promediando 200 medidas. Por tanto, la incertidumbre disminuye en:

$$U_{Promedio} = \frac{U_{combinada}}{\sqrt{200}}$$

Donde U_{total} hace referencia a la incertidumbre combinada de las medidas individuales.

La incertidumbre combinada en este caso se calcula sumando cuadráticamente las incertidumbres de cada componente (ec. 12.12):

$$U_{combinada} = \sqrt{U_{célula}^2 + U_{amplificador}^2} \approx \sqrt{2,5^2 + 0,076^2 + 0,5^2} \approx 2,55 \text{ g}$$

Por tanto, la incertidumbre final reducida por el promediado de las 200 medidas realizadas durante el proceso de calibración:

$$U_{final} = \frac{U_{combinada}}{\sqrt{200}} = \frac{2,55}{\sqrt{200}} \approx 0,18$$

Por tanto, la incertidumbre del sistema de adquisición de datos, considerando el promediado de las 200 medidas es de aproximadamente 0,18 g. Esto quiere decir que cualquier medida realizada queda comprendida dentro del intervalo: $y \in [M - 0,18; M + 0,18]$ (ec. 12.2) con una probabilidad del 95%.

Este valor representa la precisión con la que el sistema puede medir los pesos durante las pruebas, una vez que se han considerado las principales fuentes de error.



10. PLANIFICACIÓN TEMPORAL

La realización de este trabajo constó de diferentes fases. Su planificación se resume en el diagrama de Gantt que se muestra en la Figura 39 donde se recoge la duración de los tiempos empleados en cada tarea.



	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio			
	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3
Planificación y organización temporal																
Revisión bibliográfica																
Estudio de los fundamentos teóricos																
Diseño de la metodología experimental																
Diseño conceptual de la balanza																
Fabricación de la balanza																
Familiarización con Arduino																
Diseño del gemelo digital																
Conexión de los componentes electrónicos																
Diseño y fabricación de los mecanismos de calibración																
Realización ensayos experimentales																
Diseño y fabricación de la PCB																
Diseño y fabricación de la caja de los componentes electrónicos																
Redacción de la memoria																
Preparación de la presentación																
Revisiones																

Figura 39. Planificación temporal del proyecto



11. PRESUPUESTO

Se realiza la elaboración del presupuesto, que engloba de manera general los principales costes necesarios para la elaboración de la balanza aerodinámica, su sistema de adquisición y la realización de los ensayos en el túnel de viento. Aquellos costes asociados a la fabricación de los mecanismos de calibración se van a englobar dentro unos costes genéricos aproximados, sin entrar en detalle. Para ello, los costes se agruparán en directos e indirectos.

11.1.- Costes directos

Los costes directos hacen referencia a todos los gastos relacionados de manera directa con la elaboración y desarrollo de la balanza aerodinámica.

Para la realización del diseño de la balanza aerodinámica se utilizó un único equipo informático. En la siguiente tabla se resumen las características técnicas de los mismos:

Procesador 11 th Gen Intel (R) Core™
Velocidad del procesador 2,80 GHz
Memoria RAM 16,0 GB
Sistema operativo Windows 11 Pro

Tabla 3. Características técnicas del equipo informático empleado.

El valor de este equipo asciende a 1200 euros aproximadamente.

A continuación, se procede a realizar el cálculo del coste total correspondiente a la obtención de la balanza aerodinámica. Esto incluye los costes de fabricación y ensamblaje de los componentes mecánicos de la balanza y el coste de los componentes electrónicos. También se tiene en cuenta el coste de la realización de los ensayos experimentales.



11.1.1.- Costes de fabricación

En la Tabla 4 se resumen los costes de fabricación y ensamblaje de los componentes mecánicos de la balanza aerodinámica. Se consideran dos factores: el coste del material y el coste de la mano de obra. El coste unitario del material viene dado por la cantidad de material empleado, es decir, por su peso. Según la expresión (11.1) se obtiene el coste del material (€):

$$\text{Coste material (€)} = \text{Coste unit.} \left(\frac{\text{€}}{\text{Kg}} \right) \cdot \text{Peso (kg)} \quad (11.1)$$

Por otro lado, se tiene en cuenta el número de horas empleadas en la fabricación. Ese tiempo multiplicado por el coste/horario unitario, permite obtener el coste total de la mano de obra (11.2):

$$\text{Coste horario (€)} = \text{Número horas (h)} \cdot \text{Coste unit.} \left(\frac{\text{€}}{\text{h}} \right) \quad (11.2)$$

Por tanto, sumando el coste del material y el coste de la mano de obra se obtiene el coste unitario de cada componente (11.3).

$$\text{Coste}_{total\ unit.fab.} (\text{€}) = \text{Coste material} + \text{Coste horario} \quad (11.3)$$

Por último, haciendo un recuento del número de unidades de cada componente se obtiene el coste total (11.4):

$$\text{Coste}_{total\ fab.} (\text{€}) = \text{Coste}_{total\ unit.fab.} \left(\frac{\text{€}}{\text{unidad}} \right) \cdot n^{\circ} \text{ unidades} \quad (11.4)$$

Sumando el coste total de cada componente se obtiene el coste total de fabricación de la balanza aerodinámica. Por último, se tiene en cuenta el número de horas empleado para realizar el montaje de la balanza. Este tiempo, multiplicado por el coste horario, se añade al coste de fabricación de los componentes individuales según la siguiente expresión:

$$\text{Coste montaje} = \text{Coste horario} \left(\frac{\text{€}}{\text{h}} \right) \cdot N^{\circ} \text{ horas} \quad (11.5)$$



Por tanto, el coste total será:

$$\text{Coste total}_{\text{mecanismo}} (\text{€}) = \text{Coste montaje} + \text{Coste}_{\text{total fab.}} \quad (11.6)$$

coste que resulta ser de **527,31 €**.



COSTES FABRICACIÓN										
Id:	Denominación:	Unidades	Coste material		Coste mano de obra			Coste unitario:	Coste total:	
			Peso (Kg)	Coste unit. €/Kg	Horas	Coste hora	Coste M.O.			
1.01	Fabricación de brazo palanca de balanza	1	0,742	8,50 €	6,31 €	2,0	30,00 €	60,00 €	66,31 €	66,31 €
1.02	Rodamiento DN 22x8x7	2		1,20 €				0,00 €	1,20 €	2,40 €
1.03	Fabricación de soporte rodamiento	2	0,115	2,30 €	0,26 €	1,0	30,00 €	30,00 €	30,26 €	60,53 €
1.04	Fabricación de soporte de célula a brazo	2	0,122	2,30 €	0,28 €	2,0	30,00 €	60,00 €	60,28 €	120,56 €
1.05	Célula de carga	1		15,00 €	0,00 €				0,00 €	0,00 €
1.06	Fabricación de soporte de célula a placa	2	0,073	2,30 €	0,17 €	2,0	30,00 €	60,00 €	60,17 €	120,34 €
1.07	Tuerca M5	10		0,02 €				0,00 €	0,02 €	0,20 €
1.08	Tornillo M5x16	8		0,06 €				0,00 €	0,06 €	0,48 €
1.09	Arandela DN 5	8		0,01 €				0,00 €	0,01 €	0,08 €
1.10	Tornillo M5x30	6		0,07 €				0,00 €	0,07 €	0,42 €
1.11	Fabricación de placa de fijación	1	0,707	8,50 €	6,01 €	2,0	30,00 €	60,00 €	66,01 €	66,01 €
COSTES DE ENSAMBLAJE										
2.01	Montaje de la balanza	1			0,00 €	3,0	30,00 €	90,00 €	90,00 €	90,00 €
									SUMA	527,31 €

Tabla 4. Coste de fabricación de los componentes mecánicos de la balanza aerodinámica



11.1.2.- Costes de los componentes electrónicos

En la Tabla 5 se muestra el coste asociado a la adquisición de los componentes electrónicos. Cabe destacar que todos los componentes son comerciales excepto la placa de circuito impreso (PCB) que, como se indicó anteriormente, fue diseñada y creada específicamente para este proyecto, de ahí que el coste sea mayor pues engloba los siguientes conceptos:

- *Diseño*: 5 horas a $25 \frac{\text{€}}{\text{hora}} = 125 \text{ €}$
- *Fabricación*: 2 horas a $18 \frac{\text{€}}{\text{hora}} = 36 \text{ €}$
- *Montaje*: 3 horas a $17 \frac{\text{€}}{\text{hora}} = 51 \text{ €}$
- *Comprobación*: 1 hora a $10 \frac{\text{€}}{\text{hora}} = 10 \text{ €}$

El panel PCB posee unas medidas de 196 x 105 mm siendo su precio de 26,5 € aproximadamente. Por tanto, el coste total de la PCB será de:

$$\text{Coste}_{PCB} = \text{Diseño} + \text{Fabricación} + \text{Montaje} + \text{Comprobación} \quad (11.7)$$

$$\text{Coste}_{PCB} = 125 + 36 + 51 + 10 = 248,5 \text{ €}$$

La suma de todos los componentes electrónicos asciende a **873,83 €** aproximadamente.



COSTES COMPONENTES ELECTRÓNICOS					
Id:	Denominación:	Coste material			
		Unidades	Nº	Coste unit. (€)	Coste total
3.01	Placa Arduino	Ud	1	40,00 €	40,00 €
3.02	Amplificador HX-711	Ud	2	6,00 €	12,00 €
3.03	Placa Display	Ud	1	13,00 €	13,00 €
3.04	Cables DUPONT	Ud	30	0,01 €	0,30 €
3.05	Cable de datos	Ud	1	15,00 €	15,00 €
3.06	Placa de pruebas	Ud	1	5,00 €	5,00 €
3.07	Resistencias (10 kΩ)	Ud	3	0,01 €	0,03 €
3.08	Placa de circuito impreso	Ud	1	248,5	248,50 €
	Diseño	Horas	5	25,00 €	125,00 €
	Fabricación	Horas	2	18,00 €	36,00 €
	Montaje	Horas	3	17,00 €	51,00 €
	Comprobación	Horas	1	10,00 €	10,00 €
	Adquisición del panel (196 x105 mm)	Ud	1	26,50 €	26,50 €
COSTES MANO OBRA					
		Unidades	Nº	Coste hora	Coste M.O.
4.01	Conexionado de los componentes	Horas	4	30,00 €	120,00 €
4.02	Programación de la placa Arduino	Horas	12	30,00 €	360,00 €
4.03	Soldadura de la PCB	Horas	2	30,00 €	60,00 €
SUMA:					873,83 €

Tabla 5. Coste de adquisición de los componentes electrónicos y la mano de obra asociada

11.1.3.- Costes de los ensayos experimentales

El coste asociado a los ensayos experimentales se estima de la siguiente forma:

La potencia máxima del túnel de viento es de 50 kW. Utilizando un precio orientativo del kWh de 0,20 € y teniendo en cuenta que el tiempo total que el túnel de viento estuvo en funcionamiento fue de aproximadamente 20 minutos, el coste total resulta ser:

$$Coste_{ensayos} = 50 \text{ kWh} \cdot 0,333 \text{ h} \cdot \frac{0,20\text{€}}{\text{kWh}} = 3,33 \text{ €} \quad (11.8)$$



11.2.- Costes indirectos

Los costes indirectos son los gastos que afectan al proceso productivo pero que no se pueden asignar directamente a una etapa específica. En este apartado se incluyen principalmente tanto el gasto energético asociado al equipo informático donde se realizó el diseño del mecanismo, así como la programación del software de adquisición de datos y el diseño del gemelo digital. Se asume que el porcentaje de los gastos indirectos fue un 30% de los gastos directos, siendo estos por tanto de **811,34 €**.

11.3.- Resumen del presupuesto

Se presenta a continuación una tabla resumen del presupuesto y el cálculo del coste total asociado al trabajo, teniendo en cuenta tanto el beneficio industrial (6%) como los impuestos añadidos (IVA).

Total costes directos	2.704,47 €
Costes indirectos (30%)	811,34 €
Presupuesto de ejecución material	3.515,81 €
Beneficio industrial (6%)	210,95 €
Costes sin impuestos	3.726,76 €
IVA (21%)	782,62 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA =	4.509,38 €

Tabla 6. Resumen del presupuesto

El coste total del proyecto asciende a “**cuatro mil quinientos nueve con treinta y ocho euros**”.



12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

12.1.- Conclusiones

En el presente trabajo se llevó a cabo el desarrollo de una balanza aerodinámica para la medición de las fuerzas de arrastre en la asignatura de mecánica de fluidos. Esto supuso el diseño y fabricación tanto de sus componentes mecánicos como de su sistema de adquisición de datos.

En primer lugar, se llevó a cabo el diseño de los componentes mecánicos a través de herramientas de Dibujo Asistido por Computador. Una vez concluida esta fase, se procedió a la fabricación de dichos componentes. Paralelamente, en Arduino, se fue desarrollando el software que permitió la adquisición de los datos.

Se diseñó un mecanismo para la comprobación del correcto funcionamiento de este código, lo que permitió detectar un error en el diseño inicial de la balanza aerodinámica. Una vez que fue solventado, se procedió a la realización de los ensayos experimentales. Las geometrías ensayadas fueron dos: esfera y disco. La justificación de uso de estos modelos se debió a la posibilidad de comparación de los resultados obtenidos con la balanza con la bibliografía existente.

El rango de medición de la balanza se vio restringido por la frecuencia de accionamiento del ventilador del túnel de viento. La frecuencia mínima fue de 8 Hz, (5,5 m/s) por lo que no fue posible llegar a medir coeficientes de arrastre a números de Reynolds inferiores a $3,4 \cdot 10^4$. De la misma forma, la frecuencia máxima alcanzable fue de 50 Hz (35,4 m/s), así que no fue posible medir coeficientes de arrastre a números de Reynolds por encima de $22,4 \cdot 10^5$.

Los resultados obtenidos con la balanza antigua en el caso de la geometría esférica presentaron una mayor dispersión, ubicándose mayoritariamente en un rango de C_D más alto. La balanza nueva proporcionó unos resultados con menor dispersión, acercándose más a los valores teóricos.



Además, se pudo observar cómo los puntos obtenidos con la nueva balanza se alineaban mejor con las curvas teóricas, especialmente en el rango de transición donde el C_D disminuye bruscamente. Los puntos obtenidos con la balanza antigua no seguían tan de cerca la tendencia teórica, presentando una mayor variabilidad. Por tanto, a partir de los resultados obtenidos se concluyó que con la nueva balanza se obtienen valores más consistentes que se ajustan mejor a los valores esperados, mostrando una mayor fiabilidad y precisión.

En el caso de los ensayos realizados con la geometría de disco, la curva extraída de la bibliografía proporcionó una referencia experimental bien establecida, por lo que la proximidad de los datos validó la precisión de las mediciones realizadas. Los datos que se obtuvieron con la nueva balanza mostraron una mayor precisión y consistencia con los valores teóricos de la bibliografía, ajustándose mejor a la línea constante de $C_D \approx 1,1$. Los resultados de las mediciones obtenidos con la balanza antigua presentaban una mayor dispersión, lo que indicó una menor precisión y fiabilidad.

Por tanto, las mediciones obtenidas con la nueva balanza mostraron en ambos casos una mejora significativa en la precisión y consistencia en comparación con la balanza antigua. La balanza desarrollada en este trabajo obtuvo resultados que se ajustaron mejor a los valores experimentales extraídos de la bibliografía, lo que sugiere que es una herramienta más confiable para la medición del coeficiente de arrastre tanto en la geometría esférica como en el disco en todo el rango de medición. La menor dispersión de los datos confirmó su superioridad en términos de precisión y exactitud.

El uso de la nueva balanza para medir el coeficiente de arrastre C_D en discos y esferas ha permitido validar su precisión y confiabilidad. Por un lado, se han realizado las mediciones con el disco y la esfera debido a que existen curvas experimentales bien establecidas del coeficiente en función del número de Reynolds, que sirven como referencia para comparar las mediciones experimentales. Esto permitió determinar un excelente grado de ajuste de las mediciones realizadas, confirmando que el diseño de la nueva balanza es capaz de



proporcionar mediciones precisas y confiables debido a una menor dispersión y una alineación correcta con la curva extraída de la bibliografía.

12.2.- Trabajos futuros

El desarrollo de este trabajo ha implicado el aprendizaje y desarrollo de conocimientos en áreas de la ingeniería muy diversas y complejas, desde la ingeniería de fabricación debido a la necesidad de diseño y construcción de la balanza aerodinámica hasta el desarrollo del sistema de adquisición de datos e implementación inicial del gemelo digital. Sin embargo, para alcanzar el máximo potencial de este sistema, es necesario seguir profundizando en varios aspectos clave:

- Mediciones con diferentes geometrías

Se prevé realizar mediciones adicionales con diversas geometrías. Esto implica el ensayo de modelos con diferentes tamaños y geometrías, evaluando la influencia de diversos parámetros en las fuerzas de arrastre que se ejercen sobre los diferentes cuerpos. Además, se planea realizar pruebas con modelos de vehículos terrestres y aéreos.

- Desarrollo y puesta a punto del gemelo digital

Como se comentó previamente, aunque en el presente trabajo se ha diseñado el gemelo digital y se han realizado pruebas de conexión al broker MQTT, así como el envío de mensajes a través de la aplicación de IoT MQTT Panel, queda pendiente la implementación completa para el control automático de la balanza. El objetivo final es que el gemelo digital no solo recoja las medidas en tiempo real proporcionadas por el sensor, si no que también pueda enviar y recibir órdenes basadas en dichas mediciones. Esto permitirá llevar un control más preciso y eficiente del sistema mejorando significativamente su funcionalidad y aplicabilidad en diversas condiciones de prueba.



- Optimización del sistema de adquisición de datos

La precisión y fiabilidad del sistema de adquisición de datos pueden mejorarse aún más. Se recomienda la implementación de técnicas avanzadas de filtrado de datos y reducción de ruido para asegurar que las mediciones sean lo más precisas posible. Adicionalmente, se podría explorar el uso de sensores más avanzados y la integración de sistemas de calibración automáticos para reducir las incertidumbres y errores sistemáticos.

- Integración con Sistemas de Inteligencia Artificial

La implementación de algoritmos de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML) podría llevar el proyecto a un nuevo nivel. Estos algoritmos pueden analizar grandes cantidades de datos en tiempo real, identificar patrones y realizar predicciones precisas. La IA podría optimizar el control del túnel de viento y la balanza, ajustando automáticamente las condiciones de prueba para obtener resultados óptimos.

Por tanto, los trabajos futuros incluyen tanto la ampliación del rango de mediciones con diferentes geometrías y condiciones de prueba, como el desarrollo completo del gemelo digital para el control automático del sistema, lo que supone el primer paso para la integración con Sistemas de Inteligencia Artificial. Estos esfuerzos contribuirán a mejorar la precisión y versatilidad de la balanza aerodinámica, aumentando su valor en aplicaciones prácticas y en la investigación científica.



13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M. Á., Astiz, V., Ferrandez, H. M., & Meroniuc, M. (2016). Desarrollo de Balanza Externa para Túnel de Viento. *Revista de Tecnología y Ciencia*(31), 87-98.
- Arduino. (12 de julio de 2024). Arduino® UNO R4 Minima.
- AVIA. (2024). 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. China.
- Bertin, J. J., & Cummings, R. M. (2014). *Aerodynamics for Engineers* (Sexta ed.). Harlow, Inglaterra: Pearson.
- Blanco Marigorta, E., & Ballesteros Tajadura, R. (1994). *Análisis de incertidumbre en mecánica de fluidos*. Gijón. Recuperado el 6 de Julio de 2024
- Cubillos, J. S. (2019). *Diseño básico de un túnel de viento para experimentación con un aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus*. Trabajo Fin de Grado, Fundación Universidad de América, Departamento de Ingeniería Mecánica, Bogotá.
- Electronica, L. (2024). Células de carga OFF-CENTER para plataformas 150x150 mm. Italia.
- Fitzgerald, S., & Shiloh, M. (2016). *Libro de proyectos Arduino* (Primera ed.).
- González, M. A., Ezquerro, J. M., Lapuerta, V., Laverón, A., & Rodríguez, J. (2011). Components of a Wind Tunnel Balance: Design and Calibration. En J. C. Boldes (Ed.).
- GPMF. (2024). Práctica 6 - Túnel de Viento. Gijón, Asturias, España. Recuperado el 22 de Abril de 2024
- John D. Anderson, J. (2017). *Fundamentals of Aerodynamics* (Sexta ed.). Nueva York: McGraw-Hill.



- López, J. M. (2017). *Diseño de una balanza aerodinámica para túnel de viento subsónico*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Motores Térmicos.
- Miranda Martín del Campo, J. (2000). Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales. *Research Gate*.
- Orozco-Cantos, L. S., López-Ortiz, S. A., Vera-Luzuriaga, J. G., & Ordoñez-Viñán, M. A. (2018). Análisis experimental de la fuerza de arrastre en automóviles modelo por el flujo de fluido. *Ciencias técnicas y aplicadas*, 3, 316-335.
- Sorte, L. B., Gabaldo, M., & Dutra, L. S. (2017). Wind Tunnel Balance. *SAE Technical Paper*, 2017-36-0237.
- Souza, P., Girardi, D., & Oliveira, P. (2017). Drag force in wind tunnels: A new method. *Statistical Mechanics and its Applications*, 120-128.
- White, F. M. (2004). *Mecánica de Fluidos* (Quinta ed.). Rhode Island: McGraw-Hill.
- Young, D. F., Munson, B. R., & Okiishi, T. H. (2001). *A brief introduction to Fluid Mechanics* (Segunda ed.). Estados Unidos : John Wiley & Sons, INC.



14. ANEXOS

En los siguientes anexos se recogen todos los planos necesarios para la fabricación de los componentes mecánicos de la balanza aerodinámica. Seguidamente, se añade el código programado en Arduino para la obtención del sistema de adquisición de datos. Además, se muestra el código correspondiente al gemelo digital para el control de la balanza aerodinámica. Por último, se añade el esquema de diseño de la placa PCB.



14.1.- Código Arduino

```
1  #include "HX711.h"
2  #include <LiquidCrystal_I2C.h>
3  #include <Wire.h>
4
5  LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
6  const int DOUT = A3;
7  const int CLK = A2;
8  float value_100g = 0;
9  float value_1000g = 0;
10 float pendiente = 0;
11 float valorTara=0;
12 float Media=0;
13
14 HX711 balanza;
15
16 void setup() {
17   Serial.begin(9600);
18   pinMode(6, INPUT_PULLUP);
19   pinMode(2, INPUT_PULLUP);
20   Wire.begin();
21   lcd.init();
22   lcd.backlight();
23   lcd.clear();
24   balanza.begin(DOUT, CLK);
25   balanza.set_scale(); // La escala por defecto es 1
26   lcd.clear();
27
28   // Realizar la primera tara
29   lcd.setCursor(0,0);
30   Serial.print("Realizando primera tara...");
31   lcd.println("Realizando primera  ");
32   lcd.setCursor(0,2);
33   lcd.print("tara...");
34   lcd.setCursor(0,3);
35   lcd.print("  ");
36   delay(2000); // Simular el proceso de tara
37   balanza.tare(200); // Tara
38   Serial.println("Primera tara realizada.");
39   lcd.clear();
40
41
42   // Tomar medidas de 100 g
43   lcd.setCursor(0,0);
44   Serial.println("Coloque 100 g...  ");
45   lcd.println("Coloque 100 g...  ");
46   int tiempo_restante = 10;
47   for (int i = 0; i < 10; i++) { // Contador de 10 segundos
48     lcd.setCursor(0, 2);
49     lcd.print("Tiempo restante:")+lcd.print(tiempo_restante)+lcd.print("s ");
50     Serial.print(tiempo_restante);
51     lcd.setCursor(0,3);
52     lcd.print("  ");
53     delay(1000);
54     tiempo_restante--;
```



```
55 value_100g = tomarMedidas();
56 Serial.println(value_100g);
57 delay(1000);
58 lcd.print(value_100g);
59 Serial.println("Medida de 100 g tomada.");
60 delay(1000);
61 lcd.clear();
62
63 // Tomar medidas de 1000g
64 Serial.println("Coloque 1000 g... ");
65 lcd.println("Coloque 1000 g... ");
66 tiempo_restante = 10;
67 for (int i = 0; i < 10; i++) { // Contador de 15 segundos
68     lcd.setCursor(0, 2);
69     lcd.print("Tiempo restante:")+lcd.print(tiempo_restante)+lcd.print("s ");
70     Serial.print(tiempo_restante);
71     lcd.setCursor(0,3);
72     lcd.print(" ");
73     Serial.print("s");
74     delay(1000);
75     tiempo_restante--;
76 }
77 value_1000g = tomarMedidas();
78 Serial.println(value_1000g);
79 delay(1000);
80 lcd.print(value_1000g);
81 Serial.println("Medida de 1000 g tomada.");
82 delay(1000);
83 lcd.clear();
84
85 // Calcular la pendiente para la calibración
86 pendiente = 900.0 / (value_1000g - value_100g);
87 }
88
89 void loop() {
90     int Pulsador2 = digitalRead(6);
91     int BotonMedia = digitalRead(2);
92     lcd.setCursor(0, 0);
93     lcd.print("Pulse el boton 2");
94     lcd.setCursor(0,1);
95     lcd.print("para tarar...");
96     lcd.setCursor(0,2);
97     lcd.print(" ");
```



```
98
99 // Esperar la pulsación del segundo botón para la segunda tara
100
101 while (Pulsador2 == LOW) {
102     lcd.clear();
103     lcd.setCursor(0,0);
104     Serial.print("Realizando segunda tara...");
105     lcd.println("Realizando segunda ");
106     lcd.setCursor(0,2);
107     lcd.print("tara...");
108     lcd.setCursor(0,3);
109     lcd.print(" ");
110     delay(2000); // Simular el proceso de tara
111     balanza.tare(200);
112     Serial.println("Segunda tara realizada.");
113     lcd.print("Segunda tara realizada.");
114     delay(1000);
115     lcd.clear();
116     Pulsador2 = digitalRead(6);
117 }
118
119
120 // Obtener el peso en gramos y mostrarlo en la pantalla LCD
121
122 while (BotonMedia == LOW) {
123     lcd.clear();
124     lcd.print("Calculando peso...");
125     Serial.println("Calculando peso... ");
126     lcd.setCursor(0, 1);
127     lcd.print(" ");
128     lcd.setCursor(0, 2);
129     lcd.print(" ");
130     lcd.setCursor(0, 3);
131     lcd.print(" ");
132     Media=tomarMedidas();
133     float peso_medio = (Media * pendiente); // Convertir a gramos
134
135     lcd.clear();
136     lcd.setCursor(0,0);
137     lcd.print("Peso en gramos:");
138     lcd.setCursor(8,2);
139     lcd.print(peso_medio);
140
```



```
141
142     Serial.println("Peso en gramos:   ");
143     Serial.println(peso_medio);
144     delay(6000);
145     lcd.clear();
146     BotonMedia = digitalRead(2);
147 }
148
149 float lectura_balanza = balanza.get_value();
150 float peso = ((lectura_balanza) * pendiente); // Convertir a gramos
151 Serial.println(peso);
152 lcd.setCursor(0, 3);
153 lcd.print("Peso:") + lcd.print(peso) + lcd.print(" gramos ");
154
155 }
156
157
158 // Función para tomar 200 medidas y calcular el promedio
159 long int tomarMedidas() {
160     long int suma = 0;
161     for (int i = 0; i < 200; i++) {
162         suma += balanza.get_value();
163         delay(10); // Pequeño retraso entre cada medida
164     }
165     return suma / 200;
166 }
```

Figura 40. Código del sistema de adquisición en Arduino



14.2.- Código gemelo digital

```
"""
"BALANZA AERODINAMICA "
"""

from tkinter import *
import numpy as np
import paho.mqtt.client as mqtt
import time
import string
import random
import ssl
import sqlite3
import os

#CONFIGURACIÓN DEL MQTT
IP_Broker = "156.35.154.170"
usuario_MQTT="dana"
contraseña="dana2024"
topic_comando="bascula"
topic_estado="bascula/estado"
cliente_MQTT=usuario_MQTT

ruta_certificado = "C:\\Users\\profesorado\\Desktop\\ca_2021_neutrino.crt"

# Crear el cliente MQTT
mqttc = mqtt.Client(mqtt.CallbackAPIVersion.VERSION1,cliente_MQTT)
mqttc.tls_set(ruta_certificado, tls_version=ssl.PROTOCOL_TLSv1_2)
mqttc.tls_insecure_set(True)

def conectar_MQTT():
    try:
        IP_broker=MQTT_broker.get()
        puerto=8883
        timeout_seg=60
        #
        mqttc.username_pw_set(username=usuario_MQTT,password=contraseña)
        mqtt.connect(IP_Broker,puerto,timeout_seg)
        time.sleep(1)
        mqttc.loop.start()
        time.sleep(0.1)
        Lb1.insert(0,"-----")
        Lb.insert(0,"Conectado a "+IP_broker)
        Lb1.insert(0,"cliente MQTT: "+client_MQTT)
    except:
        Lb1.insert(0,"-----")
        Lb1.insert(0,"Error de conexion")

def InfoConnect(mqttc,userdate,flags,rc):
    time.sleep(0.1)
    """
```



```
El valor de rc indica el resultado de la conexión:
0: Connection succesful
1: Connection refused-incorrect protocol version
2: Connection refused-invalid client identifier
3: Connection refused-server unavailable
4: Connection refused-bad username or password
5: Connection refused-not authorised
6-255: Currently unused
"""
Lb1.insert(0,"-----")
Lb1.insert(0,"Nos hemos conectado.rc"+str(rc))
#####
def InfoPublish(mqttc,userdata,mid):
    time.sleep(0.1)
    """
    mid es el mensaje ID de la publicación
    """

    Lb1.insert(0,"-----")
    Lb1.insert(0,"Publicación realizada.mid"+str(mid))

#####
# Definimos los Callbacks del MQTT
mqttc.on_connect = InfoConnect # Callback de conectarse
mqttc.on_publish = InfoPublish # Callback de publicar

def desconectar_MQTT():
    mqttc.unsubscribe('#')
    mqttc.disconnect()
    mqttc.loop_stop()
    time.sleep(0.1)
    Lb1.insert(0,"-----")
    Lb1.insert(0,"Desconectado----")

def publicar():
    mqttc.publish(MQTT_topic.get(),MQTT_mensaje.get(),qos=2)
    time.sleep(0.1)
    Lb1.insert(0,"-----")
    Lb1.insert(0,"MENSAJE: "+MQTT_mensaje.get())
    Lb1.insert(0,"TOPIC: "+MQTT_topic.get())

def borrar():
    #MQTT_broker.set('') #si queremos que se borre el broker
    #MQTT_topic.set('') #si queremos que se borre el topic
    #MQTT_mensaje.set('') #si queremos que se borre el mensaje
    Lb1.delete(0,END) #si queremos que se borre el scrollbar

class MyApp:
    def __init__(self, parent):
        self.parent = parent
        self.parent.protocol("WM_DELETE_WINDOW", self.on_closing)
```



```
def on_closing(self):
    print("Salimos en 1 segundo---")
    time.sleep(1)
    print("Quitamos subscripciones y desconectamos MQTT---")
    mqttc.unsubscribe("#")
    mqttc.disconnect()
    mqttc.loop_stop()
    self.parent.destroy()

def RecibirDato(mqttc,userdata,msg):
    if msg.payload!=0:
        fecha_tupla=time.localtime()
        Date=time.strftime("%d%m%Y-%H:%M:%S",fecha_tupla)
        Lb1.insert(0,"-----")
        Lb1.insert(0,"MENSAJE:"+str(msg.payload.decode()))
        Lb1.insert(0,"FECHA:"+Date+"---TOPIC:",msg.topic)

        #clasificar y guardar en BD
        if consulta.get()==True:
            nombreDB=nombre_DB.get()
            final=".db"
            nombreDB_completo=carpeta_raiz+nombreDB+final
            ClasificadorDeDatos(nombreDB_completo,msg.topic,msg.payload)
            Lb1.insert(0,"-----")
            Lb1.insert(0,"Introducción en Bd activada")

def ClasificadorDeDatos(BD,Topic,Dato):
    if Topic.find("medidas")>=0:
        GuardaDato(BD,Topic,Dato)

def GuardaDato(BD,Topic,Dato):
    if Topic.find("velocidad")>=0:
        balanza_aerodinamica=Dato[0:6]
        ID_bascula=str(bascula.decode())

        fecha_tupla=time.localtime()
        Date=time.strftime("%d%m%Y-%H:%M:%S",fecha_tupla)
        dia_mes_year=time.strftime("%d%m%Y",fecha_tupla)

        dia=time.strftime("%d",fecha_tupla)
        mes=time.strftime("%m",fecha_tupla)
        year=time.strftime("%Y",fecha_tupla)

        #

        hora=time.strftime("%H",fecha_tupla)
        minuto=time.strftime("%M",fecha_tupla)
        segundo=time.strftime("%S",fecha_tupla)

        #

        velocidad x=Dato[7:11]
```



```
try:
    velocidad=load(velocidad_x)
except:
    velocidad=0
con=sqlite3.connect(BD)
cursor=con.cursor()
cursor.execute("CREATE TABLE IF NOT EXISTS tabla_volante(BAL_ID, FECHA TEXT, VELOCIDAD REAL)")
orden="INSERT INTO tabla_volante (BAL_ID, FECHA, VELOCIDAD) VALUES(?,?,?)"
parametros=[ID_bal,Date,velocidad]
cursor.exceute(orden,parametros)
con.commit()
cursor.close()
con.close()

def ayuda():
    Lb1.insert(0,".....")
    Lb1.insert(0,"Ayuda: Ingrese los datos y presione los botones correspondientes")

#CREANDO VENTANA DE TRABAJO

ventana=Tk()
app=MyApp(ventana)
ventana.config(bd=10)
ventana.config(relief="groove")
ventana.config(cursor="arrow")
ventana.config(bg='white')
ventana.title("SE para AE:Estrategias IoE--> Enviar ordenes")
ventana.geometry('900x600')
#ventana.iconbitmap("icono_01.ico")

#
# Verificamos si el archivo de la imagen existe antes de usarlo
imagen_path = "C://Users/profesorado/Desktop/balanza_aerodinamica00.png"
if os.path.exists(imagen_path):
    foto_base = PhotoImage(file=imagen_path)
    foto1 = foto_base.zoom(6, 6)
    foto_final = foto1.subsample(10, 10)
    marco = Label(image=foto_final)
    marco.place(x=580, y=50)
else:
    print(f"Advertencia: El archivo de imagen {imagen_path} no existe. No se mostrará la imagen.")

MQTT_broker=StringVar()
MQTT_broker.initialize(IP_Broker)
entrada_1=Entry(ventana, justify=LEFT, textvariable=MQTT_broker)
entrada_1.place(x=50,y=85)

MQTT_topic=StringVar()
MQTT_topic.initialize(topic estado)
```



```
entrada_2=Entry(ventana, justify=LEFT, width=50, textvariable=MQTT_topic)
entrada_2.place(x=50, y=210)
MQTT_mensaje=StringVar()
entrada_3=Entry(ventana, justify=LEFT, width=80, textvariable=MQTT_mensaje)
entrada_3.place(x=50, y=260)

etiqueta_1=Label(ventana, text="ORDENES HACIA BALANZA", fg='black', bg='white')
etiqueta_1.place(x=50, y=0)
etiqueta_1.config(font=("Calibri", 16))

etiqueta_2=Label(ventana, text=".....", fg='blue', bg='white')
etiqueta_2.place(x=0, y=25)

etiqueta_3=Label(ventana, text="Dirección IP del broker", fg='blue', bg='white')
etiqueta_3.place(x=10, y=50)

etiqueta_4=Label(ventana, text=".....", fg='blue', bg='white')
etiqueta_4.place(x=10, y=135)

etiqueta_5=Label(ventana, text="Publicar mensaje", fg='blue', bg='white')
etiqueta_5.place(x=10, y=160)

etiqueta_6=Label(ventana, text="Topic", fg='blue', bg='white')
etiqueta_6.place(x=50, y=185)

etiqueta_7=Label(ventana, text="Mensaje", fg='blue', bg='white')
etiqueta_7.place(x=50, y=235)

etiqueta_8=Label(ventana, text=".....", fg='blue', bg='white')
etiqueta_8.place(x=50, y=330)
etiqueta_9=Label(ventana, text="PANEL INFORMATIVO: órdenes enviadas", fg='blue', bg='white')
etiqueta_9.place(x=50, y=360)

#PANEL INFORMATIVO

scroll=Scrollbar(ventana) #barra deslizamiento vertical
Lb1=Listbox(ventana, yscrollcommand=scroll.set)
Lb1.config(width=80)
Lb1.config(height=5)
Lb1.place(x=50, y=400)
scroll.config(command=Lb1.yview)
scroll.place(x=550, y=400)

boton_1=Button(ventana, text="Conectar", command=conectar_MQTT, fg='white', bg='green')
boton_1.place(x=50, y=110)

boton_2=Button(ventana, text="Desconectar", command=desconectar_MQTT, fg="white", bg='red')
boton_2.place(x=400, y=110)

boton_3=Button(ventana, text="Publicar", command=publicar, fg="black", bg='white')
boton_3.place(x=50, y=300)

boton_4=Button(ventana, text="Borrar", command=borrar, fg="black", bg='white')
boton_4.place(x=500, y=500)

boton_5=Button(ventana, text="AYUDA", command=ayuda, fg="black", bg="white")
boton_5.place(x=500, y=10)

ventana.mainloop()
```

Figura 41. Código del gemelo digital en Python



14.3.- Esquema de diseño de la PCB

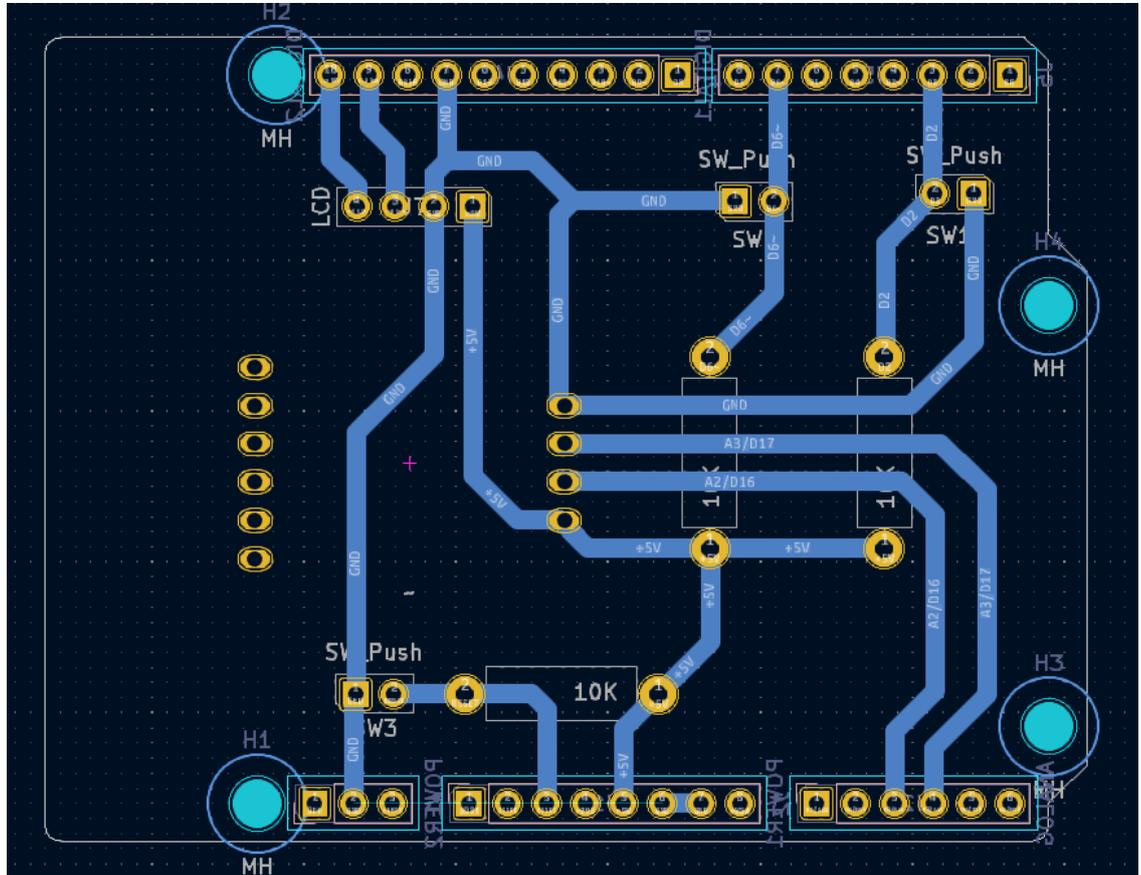
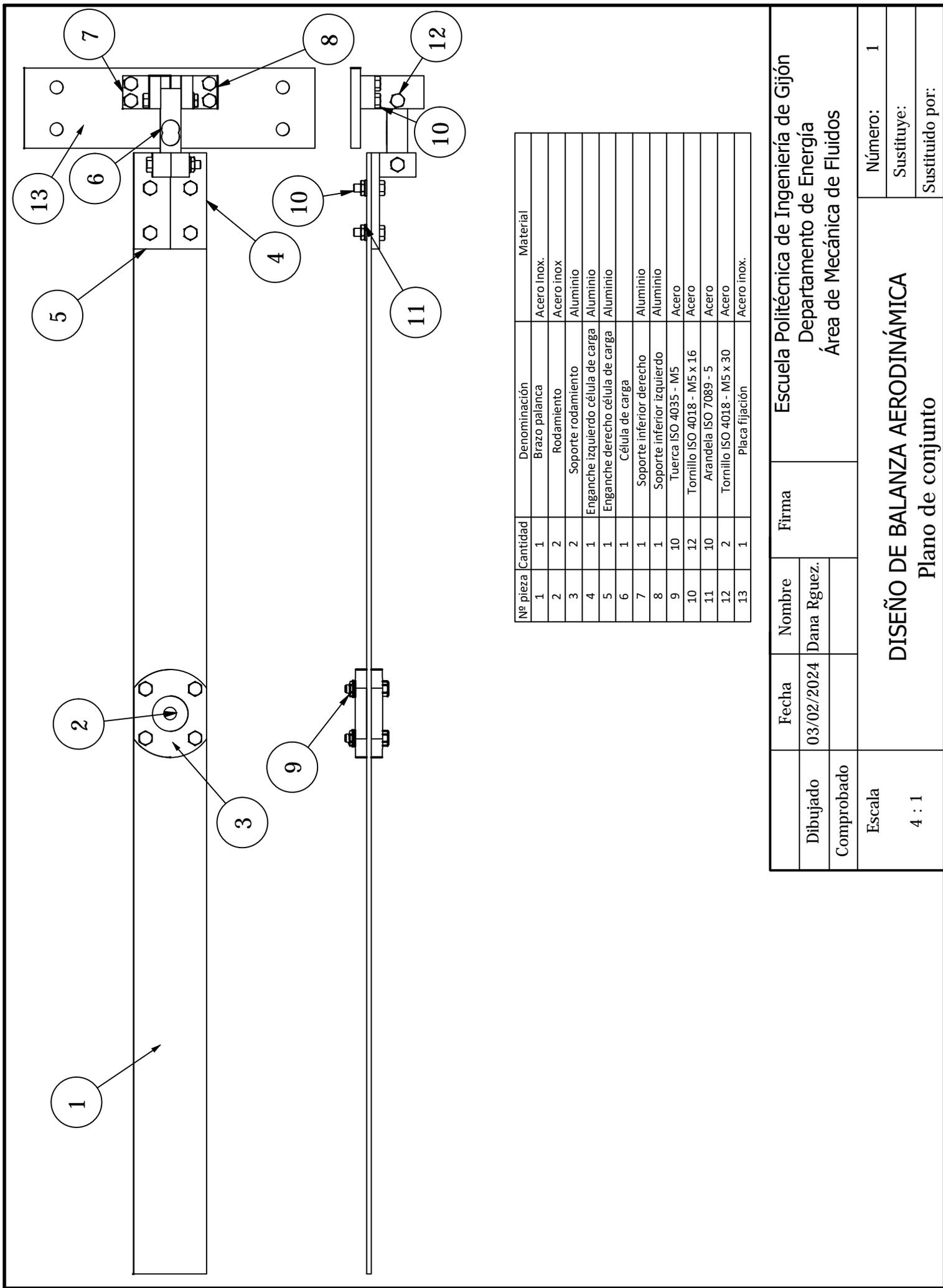


Figura 42. Esquema de diseño de la PCB



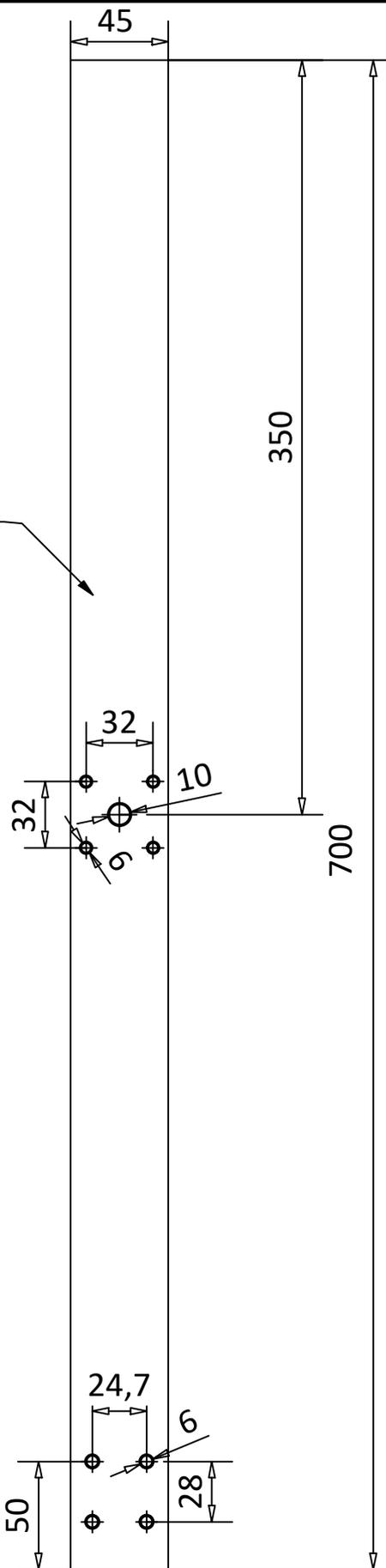
14.4.- Planos



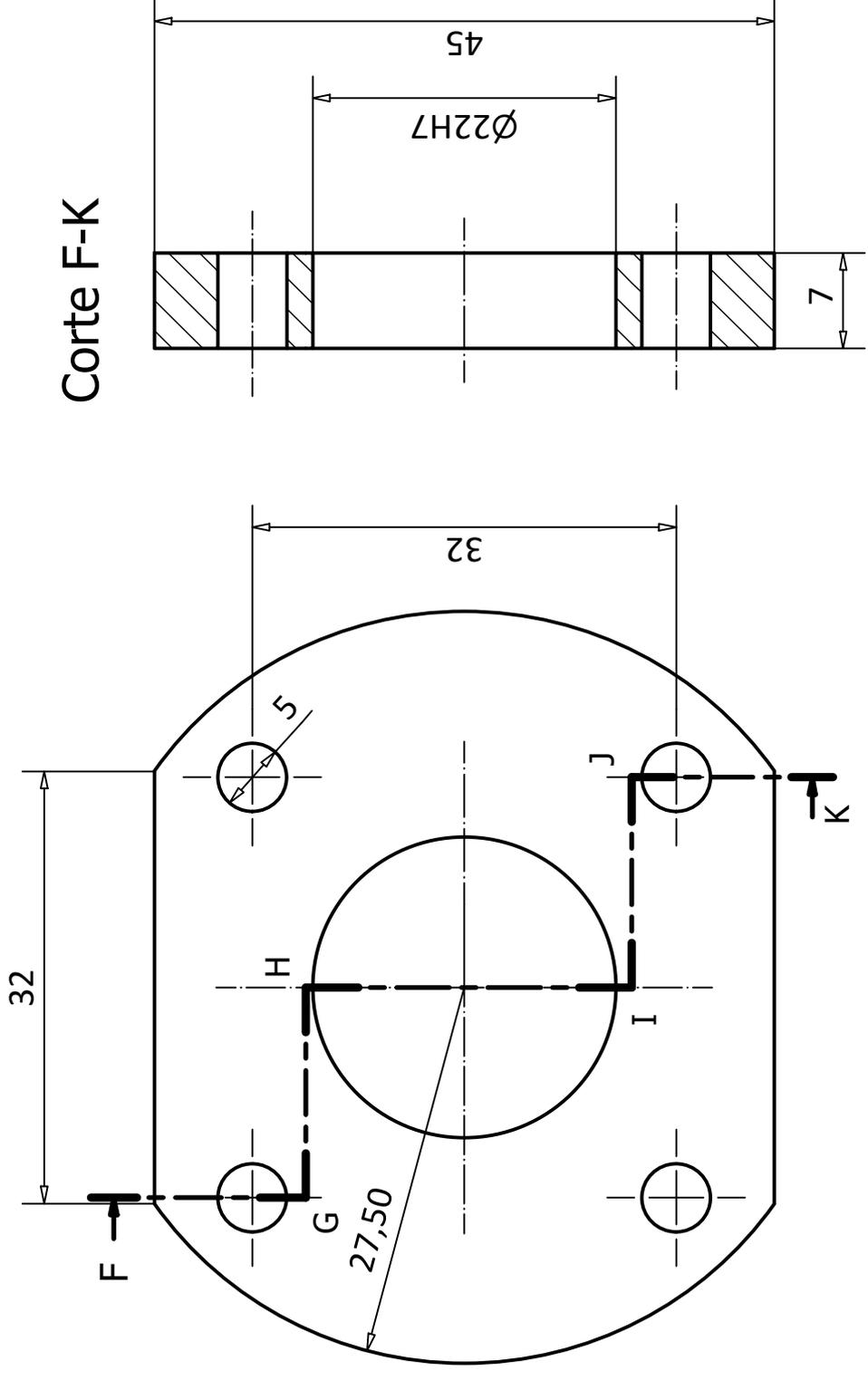
Nº pieza	Cantidad	Denominación	Material
1	1	Brazo palanca	Acero Inox.
2	2	Rodamiento	Acero inox
3	2	SopORTE rodamiento	Aluminio
4	1	Enganche izquierdo célula de carga	Aluminio
5	1	Enganche derecho célula de carga	Aluminio
6	1	Célula de carga	
7	1	SopORTE inferior derecho	Aluminio
8	1	SopORTE inferior izquierdo	Aluminio
9	10	Tuerca ISO 4035 - M5	Acero
10	12	Tornillo ISO 4018 - M5 x 16	Acero
11	10	Arandela ISO 7089 - 5	Acero
12	2	Tornillo ISO 4018 - M5 x 30	Acero
13	1	Placa fijación	Acero inox.

Dibujado	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
	03/02/2024			
Comprobado				
Escala	DISEÑO DE BALANZA AERODINÁMICA Plano de conjunto			
4 : 1				
Número:				1
Sustituye:				
Sustituido por:				

Espesor 3

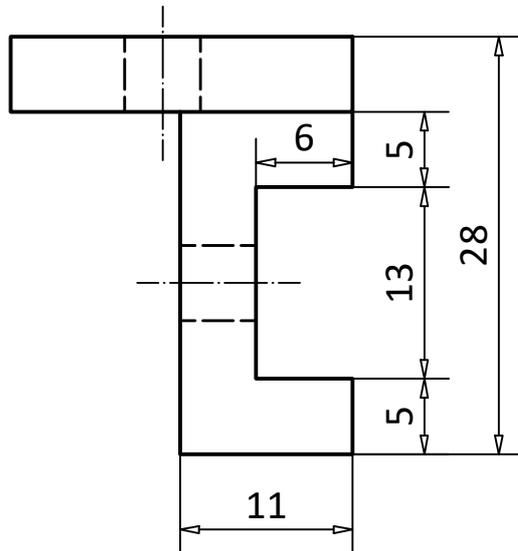
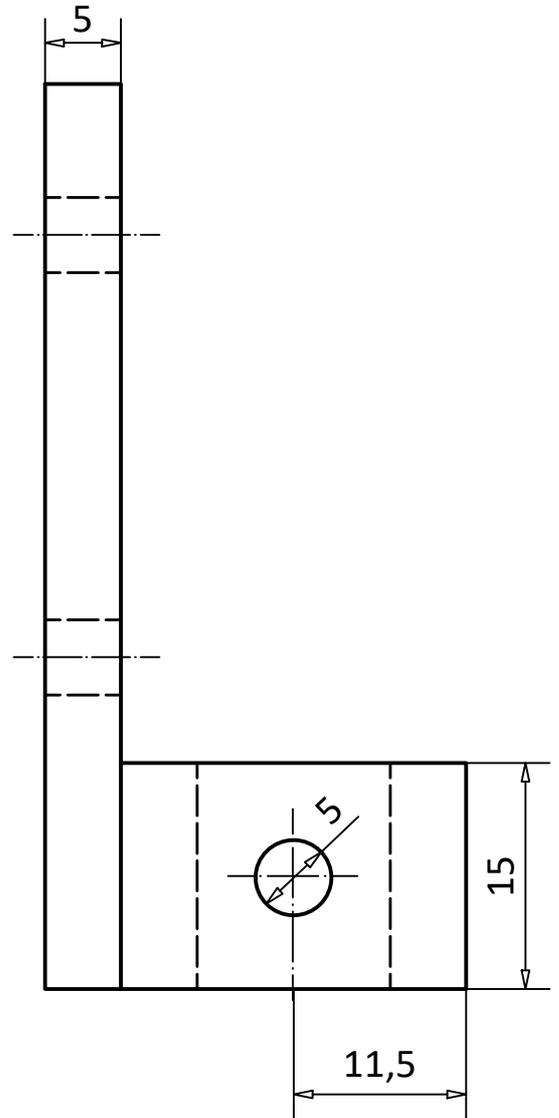
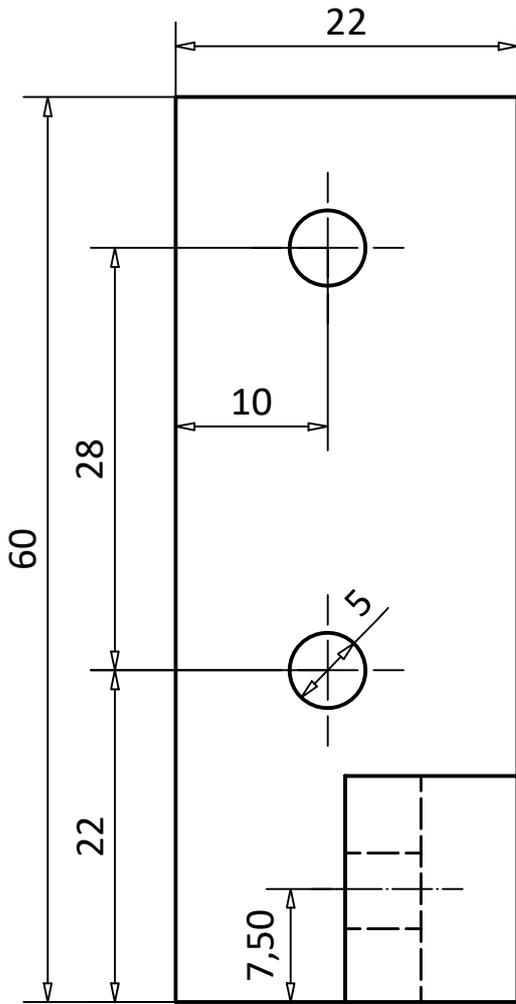


	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Dibujado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Comprobado				
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Brazo palanca			Número: 1
1 : 3				Sustituye:
				Sustituido por:

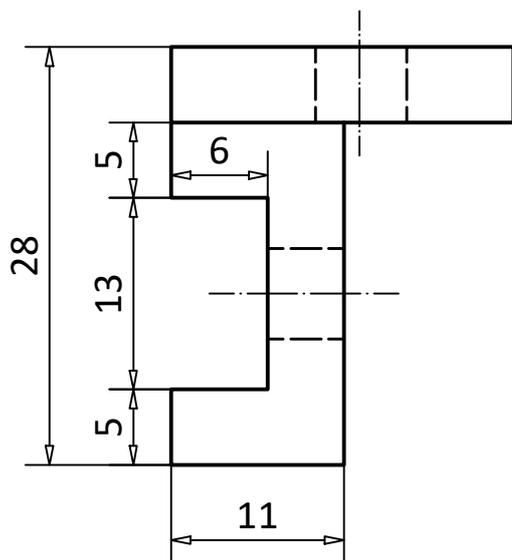
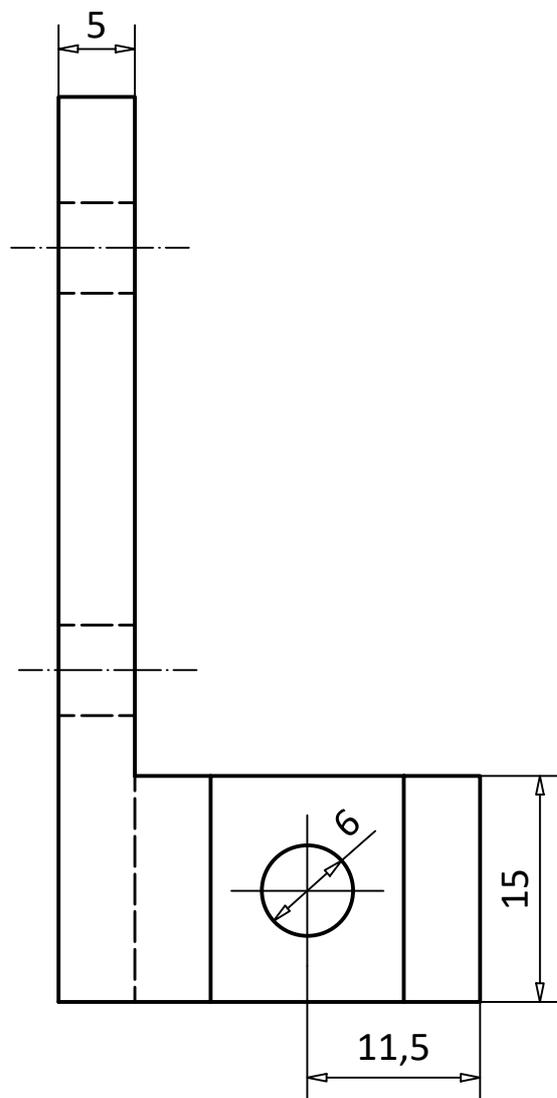
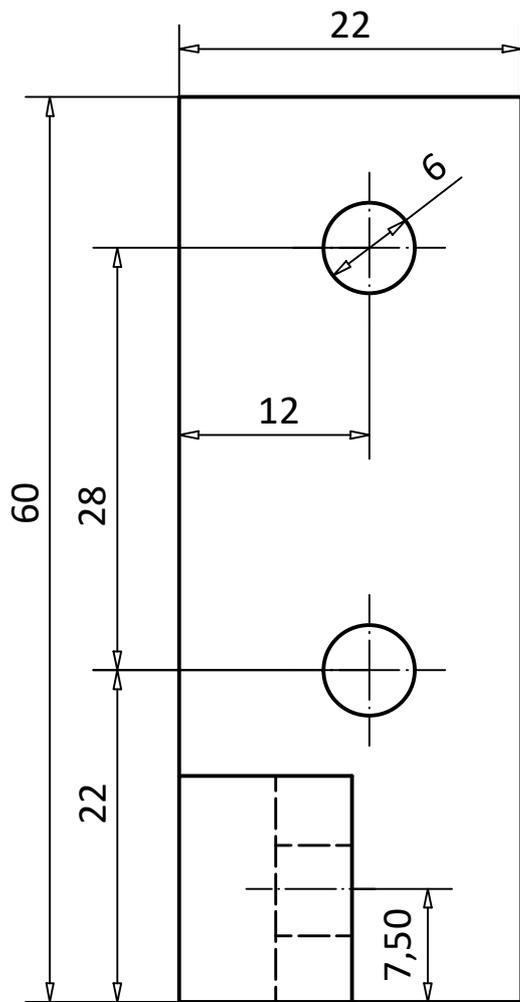


Corte F-K

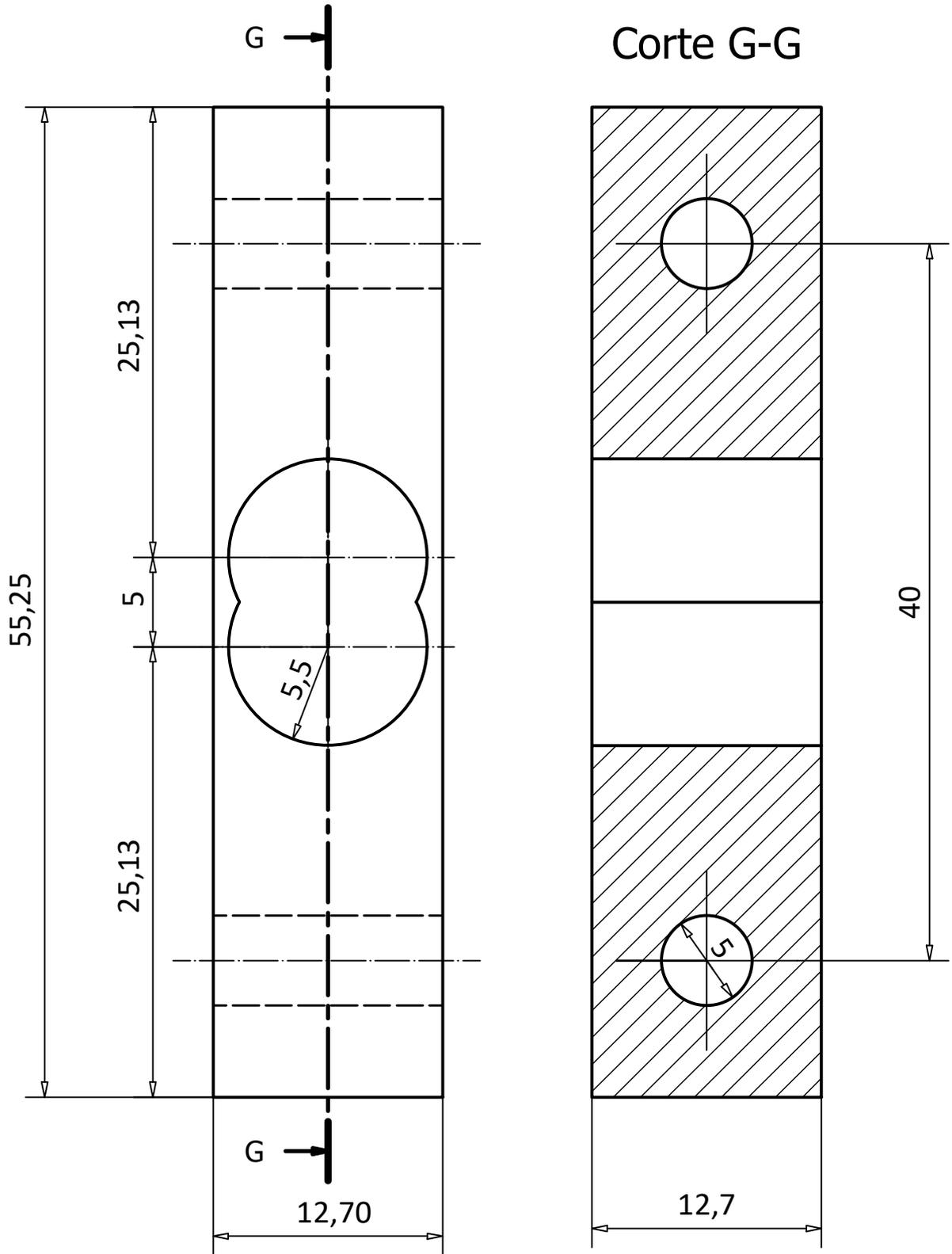
Dibujado	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Comprobado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Soporte rodamiento			Número: 3
2 : 1				Sustituye:
				Sustituido por:



	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Dibujado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Comprobado				
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Enganche izquierdo célula de carga			Número: 4
2 : 1				Sustituye:
				Sustituido por:

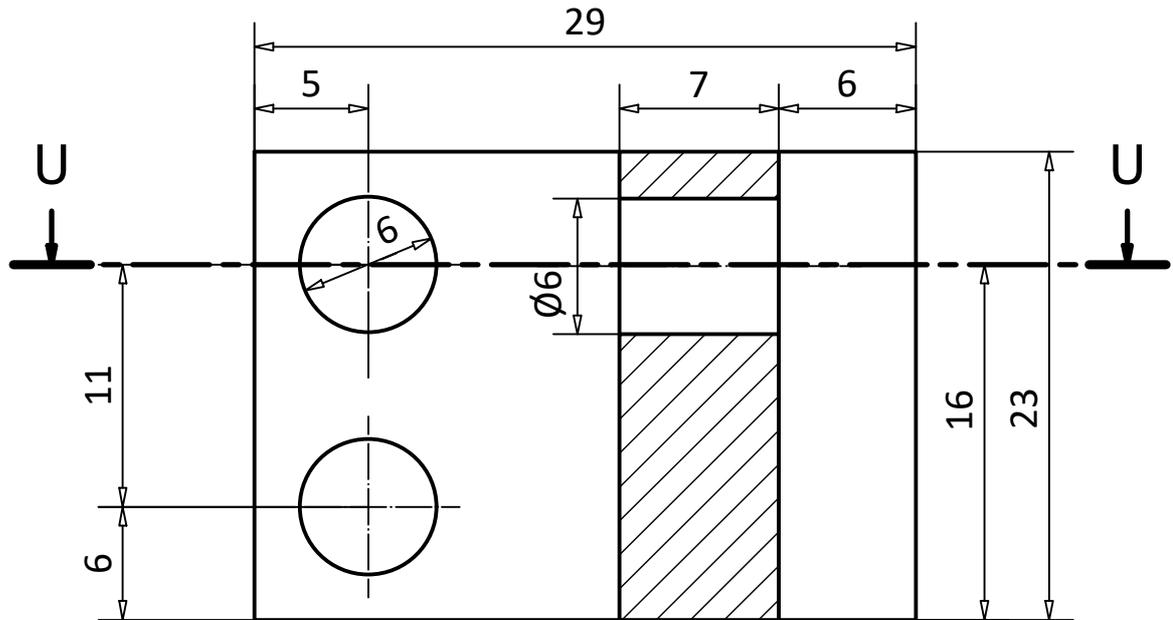


	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Dibujado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Comprobado				
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Enganche derecho célula de carga			Número: 5
2 : 1				Sustituye:
				Sustituido por:

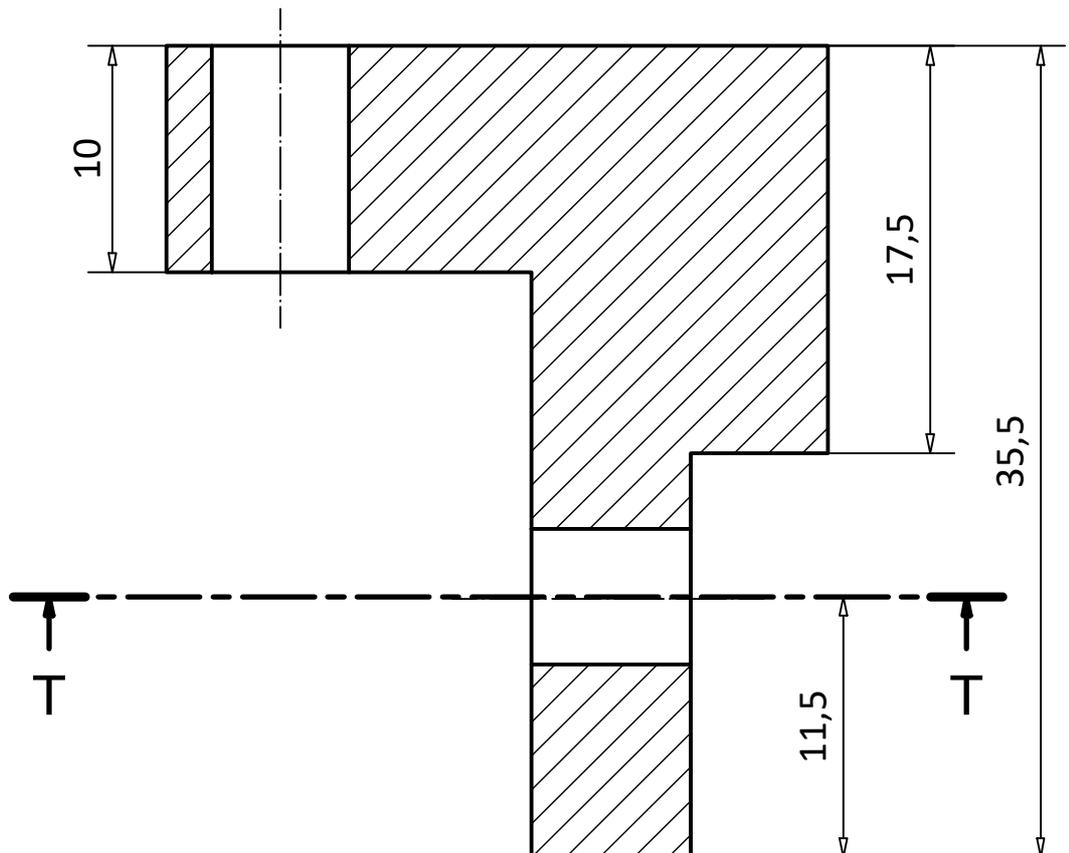


	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Dibujado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Comprobado				
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Célula de carga			Número: 6
3 : 1				Sustituye:
				Sustituido por:

Corte T-T

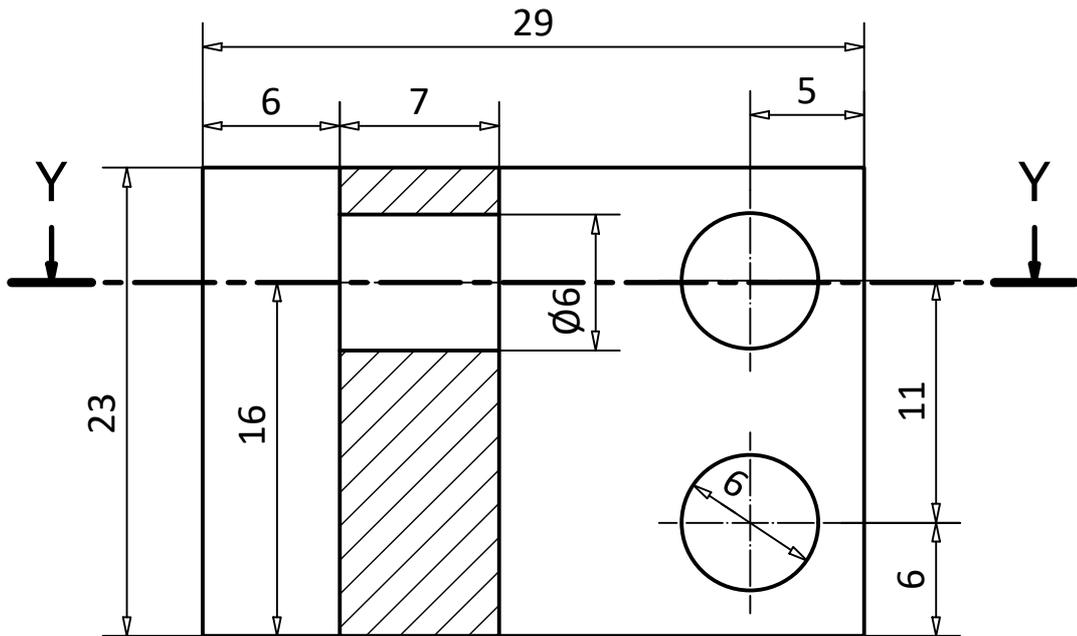


Corte U-U

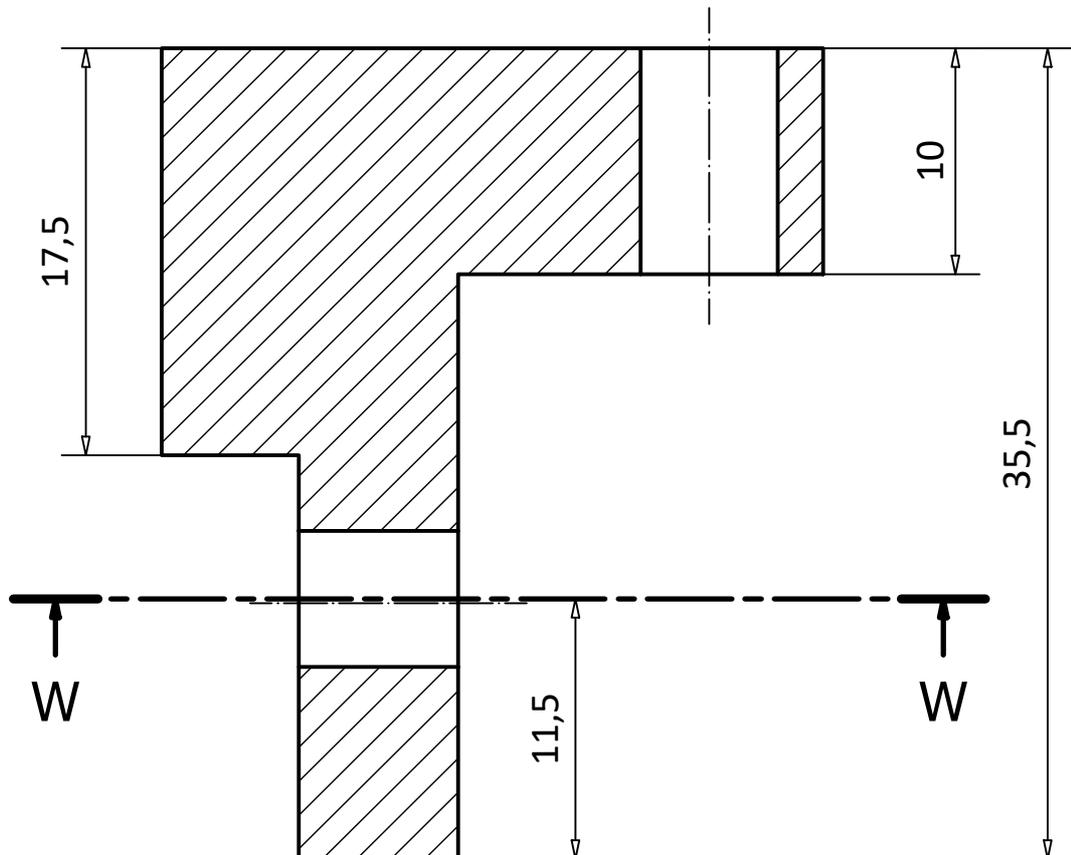


	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Dibujado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Comprobado				
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Soporte inferior izquierda			Número: 8
3 : 1				Sustituye:
				Sustituido por:

Corte W-W

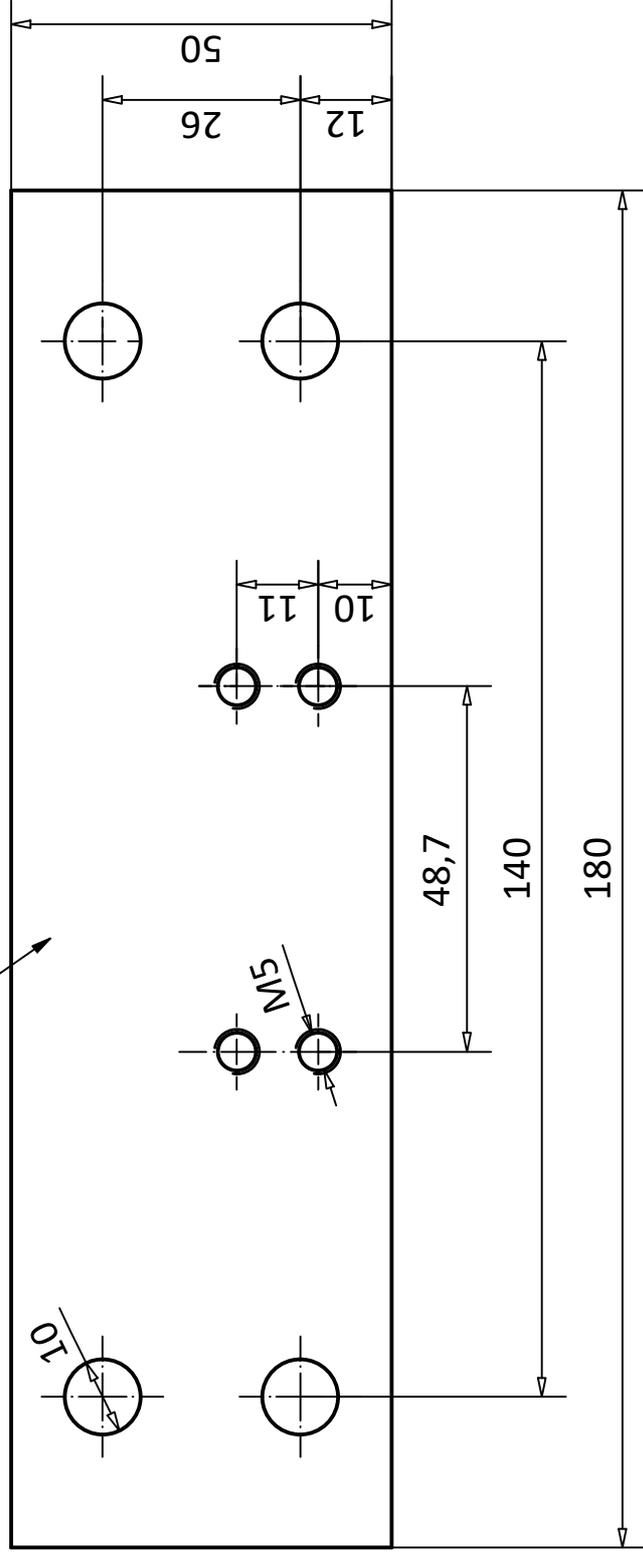


Corte Y-Y



	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Dibujado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Comprobado				
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Soporte inferior derecha			Número: 7
3 : 1				Sustituye:
				Sustituido por:

Esesor 6



Dibujado	Fecha	Nombre	Firma	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Departamento de Energía Área de Mecánica de Fluidos
Comprobado	03/02/2024	Dana Rguez.		
Escala	BALANZA AERODINÁMICA Placa sujección			Número: 13
1 : 1				Sustituye:
				Sustituido por: