



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

INSTRUMENTACIÓN DE UN TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

PRESENTA:

JOSÉ ANTONIO SÁNCHEZ LEÓN

ASESORES:

M.C. MANUEL APARICIO RAZO

M.C. DAVID CÉSAR MALPICA MOREDA

PUEBLA, PUEBLA

SEPTIEMBRE 2015

Agradecimientos

A mi madre, por ser un ejemplo constante de perseverancia y fortaleza; a quien, por su cariño y bondad, dedico esta obra y todos los logros que he conseguido.

A mi familia, por su amor, paciencia y comprensión que me ha motivado a seguir adelante en cada momento de mi vida.

A mis asesores, Manuel y David, por su confianza y firme apoyo durante la realización del proyecto.

Al departamento de ingenierías de la Universidad Iberoamericana de Puebla (UIA), por otorgar el financiamiento y los recursos que hicieron posible la construcción de este proyecto.

Índice general

Agradecimientos	I
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Resumen	1
Abstract	1
Capítulo 1. Introducción	2
1.1 Estado del arte	2
1.1.1 Túnel de viento de Kirkwood HS - NASA	2
1.1.2 Túnel de viento de la RAU	3
1.1.3 Túnel de viento del IPN	5
1.1.4 Túnel de viento de la UNAM	6
1.2 Justificación	7
1.2.1 Industria automotriz en Puebla	7
1.2.2 Producción de automóviles	8
1.2.3 Ingeniería de viento	10
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 Diagrama a bloques	12
Capítulo 2. Principios básicos de aerodinámica	14
2.1 Definiciones	14
2.1.1 Líneas de corriente	14
2.1.2 Distribución de la velocidad	15
2.1.3 Flujo laminar y turbulento	17
2.2 Propiedades de los fluidos	17
2.2.1 Viscosidad	18
2.2.2 Propiedades del aire	19
2.3 Capa límite	20
2.4 La ecuación de Bernoulli	20
2.4.1 Aplicación de la ecuación de Bernoulli	21

2.5 Coeficiente de presión	22
2.5.1 Distribución de presión sobre los cuerpos.....	23
2.5.2 Distribución de presión sobre el perfil de un automóvil	23
Capítulo 3. Fuerzas aerodinámicas	26
3.1 Arrastre, sustentación y fuerza lateral	26
3.2 Coeficientes de arrastre y sustentación para varios vehículos de carretera.....	27
3.3 Balanzas de fuerza.....	29
3.3.1 Balanza de cable	29
3.3.2 Balanza de plataforma.....	30
3.3.3 Balanza de yugo.....	30
3.3.4 Balanza piramidal.....	31
3.4 Correcciones en los experimentos de túneles de viento	31
Capítulo 4. Diseño y construcción de la balanza de fuerzas	34
4.1 Túnel de viento de la Universidad Iberoamericana de Puebla (UIA).	34
4.2 Determinando el tamaño máximo del modelo	34
4.3 Cálculo de las fuerzas de arrastre y sustentación	35
4.3.1 Fuerza de sustentación	35
4.3.2 Fuerza de arrastre.....	35
4.3.3 Fuerzas generadas por el momento de cabeceo	36
4.4 Parámetros para el diseño y construcción de la balanza de fuerzas	36
4.5 Selección de los sensores para la cámara de prueba	38
4.5.1 Medición de la velocidad del viento.....	38
4.5.2 Anemómetro.....	38
4.5.4 Temperatura y humedad relativa	39
4.5.5 Presión.....	40
4.6 Selección de los sensores de fuerza	41
4.6.1 Galgas extensiométricas.....	41
4.6.2 Sensor de fuerza de rango dual.....	41
4.7 Modelo en CAD.....	43
4.8 Construcción de la balanza de fuerzas	46
Capítulo 5. Instalación del sistema de instrumentación y evaluación del modelo Jaguar XKR	52

5.1 Instalación de la balanza de fuerzas.....	52
5.2 Instalación de los sensores de temperatura, humedad y presión.....	54
5.3 Caracterización del túnel de viento	55
5.5 Diseño del instrumento virtual en LabVIEW®	56
5.6 Evaluación del modelo a escala Jaguar XKR	59
5.6.1 Resultados de las condiciones ambientales y cálculo de la densidad de aire.	62
5.6.2 Cálculo del coeficiente de arrastre (C_D) del modelo.....	63
Conclusiones	67
Trabajo a Futuro	68
Bibliografía	69
Apéndices.....	72
A. Planos de construcción de la balanza de fuerzas	72
B. Resultados de la prueba sobre el vehículo Jaguar XKR	83

Índice de figuras

Figura 1.1 Túnel de viento Kirkwood HS (Izquierda). Perfil alar dentro de la cámara de pruebas (Derecha)	3
Figura 1.2 Túnel de viento de la RAU	4
Figura 1.3 Balanza de fuerzas de la RAU	4
Figura 1.4 Túnel de viento del IPN	5
Figura 1.5 Balanza de fuerzas del IPN	6
Figura 1.6 Túnel de viento de la UNAM.....	6
Figura 1.7 La historia del arrastre en los automóviles	9
Figura 1.8 Colapso del puente Tacoma Narrows en 1940	11
Figura 1.9 Diagrama a bloques	12
Figura 2.1 Líneas de corriente en un flujo de régimen estacionario sobre un perfil alar .	13
Figura 2.2 Flujo adherido sobre las líneas de corriente de un automóvil (A), y el flujo separado en la parte trasera de la forma de un automóvil más realista (B).....	15
Figura 2.3 Vista lateral de la distribución de velocidad cerca del plano en un flujo libre.....	16
Figura 2.4 Rastro de partículas en un flujo laminar y turbulento.....	17
Figura 2.5 Distribución de la velocidad entre dos planos paralelos, causada por el movimiento del plano superior. El plano inferior es estacionario, y el superior se mueve a causa de la fuerza F a una velocidad constante V_{∞}	18
Figura 2.6 Capa límite cerca de la superficie de un vehículo, y la distribución de la velocidad típica dentro de esta capa.....	20
Figura 2.7 Ejemplo usado para describir la aplicación de la ecuación de Bernoulli	21
Figura 2.8 Distribución de velocidad y coeficiente de presión negativo sobre el eje central de un hemisferio sumergido en un flujo uniforme V_{∞} , θ es la medición de la posición angular sobre el eje central.	23
Figura 2.9 Distribución de coeficientes de presión medidos sobre el perfil de un automóvil bidimensional.....	24
Figura 3.1 Sistema de coordenadas usado para definir las direcciones de las cargas aerodinámicas sobre un vehículo, y el área frontal utilizada para definir los coeficientes de fuerza.	26
Figura 3.2 Diagrama de una balanza de cable.	30
Figura 3.3 Balanza piramidal.....	31
Figura 3.4 Líneas de corriente cerca de un cuerpo en una corriente libre (A), y cuando está confinado por dos paredes rígidas (B).	32
Figura 4.1 Túnel de viento subsónico de la UIA y sus elementos principales.	34
Figura 4.2 Anemómetro.....	39
Figura 4.3 Sensor de humedad relativa y temperatura	39
Figura 4.4 Sensor de presión	40

Figura 4.5	Galgas extensiométricas clásicas.....	41
Figura 4.6	Sensor de fuerza de rango dual	42
Figura 4.7	Diseño 3D de la balanza de fuerzas	43
Figura 4.8	Gato hidráulico.....	45
Figura 4.9	Base para riel.....	47
Figura 4.10	Montado del stock en el centro de maquinado	47
Figura 4.11	Brazo izquierdo de la bisagra	48
Figura 4.12	Brazo derecho de la bisagra.....	48
Figura 4.13	Base para sensor de cabeceo.....	49
Figura 4.14	Base fija de la bisagra	49
Figura 4.15	Monturas para sensores fabricadas en impresora 3D	50
Figura 4.16	Montura para sensor de cabeceo.....	50
Figura 4.17	Balanza de fuerzas terminada.....	51
Figura 5.1	Balanza de fuerzas colocada debajo de la cámara de prueba.....	52
Figura 5.2	Modelo Jaguar XKR sobre la balanza de fuerzas	53
Figura 5.3	Pieza de montado	54
Figura 5.4	Sensores montados en la cámara de pruebas.....	54
Figura 5.5	Gráfica Voltaje – Velocidad de viento	55
Figura 5.6	Anemómetro durante la caracterización	56
Figura 5.7	Máquina de estados del instrumento virtual.....	57
Figura 5.8	Panel frontal del instrumento virtual.....	58
Figura 5.9	Cálculo del área frontal del modelo en SolidWorks®.....	60
Figura 5.10	Modelo montado sobre la balanza de fuerzas	60
Figura 5.11	Modelo a escala durante la prueba.....	61
Figura 5.12	Túnel de viento durante las pruebas	61
Figura 5.13	Gráficas de las condiciones ambientales	62
Figura 5.14	Fuerza de arrastre contra velocidad de viento.....	63
Figura 5.15	Comparación de los resultados experimentales	66

Índice de tablas

Tabla 1.1 Instrumentación empleada por cada institución	7
Tabla 2.1 Aire en condición “estándar”.	19
Tabla 2.2 Valores típicos del coeficiente de presión (C_p)	22
Tabla 3.1 Coeficientes de arrastre y sustentación para varios vehículos de carretera	28
Tabla 4.1 Parámetros de diseño para la balanza del túnel de viento	36
Tabla 4.2 Rango y resolución del anemómetro.....	39
Tabla 4.3 Rango y resolución del sensor H1H6130.....	40
Tabla 4.4 Rango y resolución del sensor MS5803-14BA.....	41
Tabla 4.5 Resolución y rango del Dual-Force Range Sensor	42
Tabla 4.6 Características de la guía lineal.....	44
Tabla 4.7 Características de los rodamientos.....	45
Tabla 4.8 Gatos hidráulicos Truper®.....	46
Tabla 5.1 Especificaciones del Jaguar XKR.....	59
Tabla 5.2 Características de modelo a escala	59
Tabla 5.3 Coeficientes de arrastre medidos y corregidos obtenidos de las pruebas.....	65

Resumen

En este trabajo, se presenta el diseño y puesta en marcha de un sistema de instrumentación para realizar pruebas automatizadas dentro de un túnel de viento subsónico de tipo académico. Este sistema registra las fuerzas aerodinámicas (sustentación, arrastre y cabeceo) que actúan sobre modelos a escala, a medida que la velocidad de viento aumenta. Las gráficas resultantes permiten estimar los coeficientes adimensionales C_L y C_D , los cuales determinan el desempeño aerodinámico de los modelos. Además, el sistema cuenta con sensores que miden la temperatura, humedad relativa y presión de la corriente de aire. A través de la medición de estas variables físicas podemos calcular la densidad de aire (ρ) en cada prueba. Finalmente, se presentan los resultados experimentales de la evaluación de un modelo a escala del vehículo Jaguar XKR y se comentan los factores de corrección que se deben aplicar en el análisis de resultados.

Abstract

In this work, the design and start-up of an instrumentation system for an educational wind tunnel is presented. This system records the aerodynamic forces (lift, drag and pitch) that act on scale models as the wind speed increases. The resulting charts let us estimate the nondimensional coefficients C_L and C_D , which determine the aerodynamic performance of the models. In addition, the system has sensors to monitor the temperature, relative humidity and pressure of the airstream. The air density (ρ) can be obtained by reading these physical conditions. Finally, the evaluation results of a Jaguar XKR scale model are presented and the correction factors needed for the results analysis are discussed.

Capítulo 1. Introducción

En México, el interés en la aerodinámica de vehículos terrestres y construcciones se ha hecho presente a través de una cantidad de proyectos de diseño o reacondicionamiento de túneles de viento. Sin embargo, pocos esfuerzos se han emprendido por adquirir información esencial de las pruebas llevadas a cabo en su interior o por explicar las técnicas que intervienen en el análisis de sus resultados. Estas mediciones permiten caracterizar el desempeño aerodinámico de automóviles y edificios, ayudándonos a tomar decisiones desde etapas tempranas del diseño.

Entre los resultados más importantes obtenidos de los experimentos de túneles de viento en programas de diseño automotriz se encuentran las fuerzas de arrastre y sustentación. El arrastre es a menudo el componente que recibe la mayor atención por tener un efecto dominante en el consumo de combustible a una velocidad dada. Por otro lado, la sustentación es de vital importancia para determinar la controlabilidad de autos de alto desempeño y autos de carreras, volviéndose crucial a medida que la velocidad aumenta.

El propósito de esta tesis es el diseño y puesta en marcha de un sistema de instrumentación para realizar mediciones automatizadas dentro de un túnel de viento subsónico de tipo académico [1]. Se propone un mecanismo acoplado con sensores de fuerza (balanza de fuerzas) para determinar las fuerzas aerodinámicas de arrastre y sustentación en modelos a escala de automóviles y edificios. El sistema contará además con sensores para monitorear las propiedades del fluido (aire) tales como velocidad, temperatura, humedad y presión. El usuario podrá interactuar con el sistema y visualizar los resultados a través de la computadora.

1.1 Estado del arte

1.1.1 Túnel de viento de Kirkwood HS - NASA

Entre 1993 y 1996, el Centro de Investigaciones Glenn (Glenn Research Center) de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) respaldó un proyecto en el cual estudiantes de bachillerato construían túneles de viento subsónicos pequeños para usarlos en sus salones de clase y demostrar principios aeronáuticos [2]. El propósito del proyecto era el avance del nivel de conocimiento de los estudiantes en las áreas de matemáticas y ciencia.

Estudiantes de la Preparatoria Kirkwood (Kirkwood High School) diseñaron y construyeron un túnel de viento bajo la dirección del ingeniero aeroespacial John Mackin [3]. El túnel es de tipo abierto y cuenta con una cámara de prueba. La cámara de prueba es de 1 ft de ancho por 1 ft de alto y tiene un largo de 2 ft.



Fig. 1.1 Túnel de viento de Kirkwood HS (Izquierda). Perfil alar dentro de la cámara de pruebas (Derecha).

El túnel está equipado con dos sensores de fuerza (Vernier® Dual-Range Force Sensor) para medir el arrastre y la sustentación de perfiles alares [4]. El rango de medición de los sensores es de 0 – 10 N con una sensibilidad de ± 0.01 N. Los sensores están conectados a una computadora donde se almacena la información para realizar análisis estadísticos como fuerza promedio, desviación estándar, etc.

1.1.2 Túnel de viento de la RAU

En 2002, F. F. Pieterse presentó el diseño de una balanza de fuerzas externa de tres componentes para el túnel de viento subsónico de la Universidad Rand Afrikaans (Rand Afrikaans University), ahora Universidad de Johannesburgo, en Sudáfrica [5]. El túnel, ubicado en el Departamento de Ingeniería Mecánica, es de circuito cerrado y tiene dos cámaras de prueba (Fig. 1.2). La cámara de prueba de baja velocidad tiene 2.1 metros de ancho y 2.4 metros de altura y tiene una velocidad de viento promedio máxima de 7.3 m/s. La cámara de prueba de alta velocidad es de 1 metro de ancho por 1 metro de alto y tiene una velocidad de viento promedio máxima de 20.93 m/s (75 km/hr).

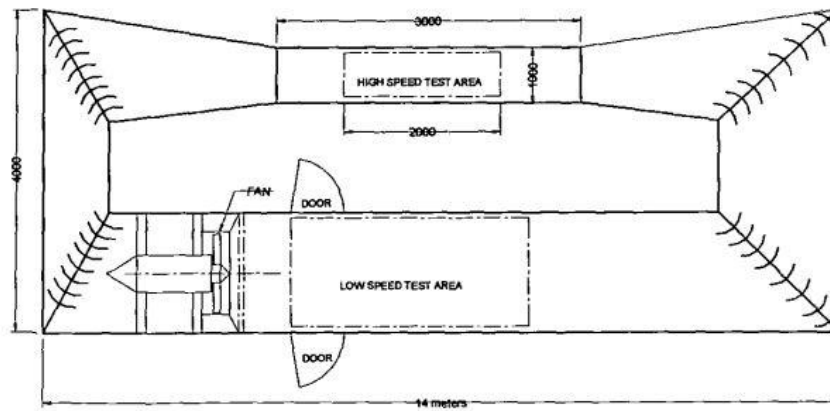


Fig. 1.2 Túnel de viento de la RAU.

La balanza de fuerzas externa utiliza galgas extensiométricas para medir las fuerzas de arrastre, sustentación y cabeceo de alas y vehículos aéreos. Además, cuenta con un mecanismo de dos brazos, controlado por un motor a pasos, para variar el ángulo de ataque de los modelos de -15° a 35° . El rango de medición es de 0 – 80 N para la fuerza de sustentación y de 0 – 7N para las fuerzas de arrastre y cabeceo. Una tarjeta de adquisición de datos PCI-6023E fue utilizada para medir el voltaje de los sensores y enviar las señales de control al motor a pasos. Finalmente, la información es presentada al usuario en un instrumento virtual, desarrollado en LabVIEW®, a través de la computadora.

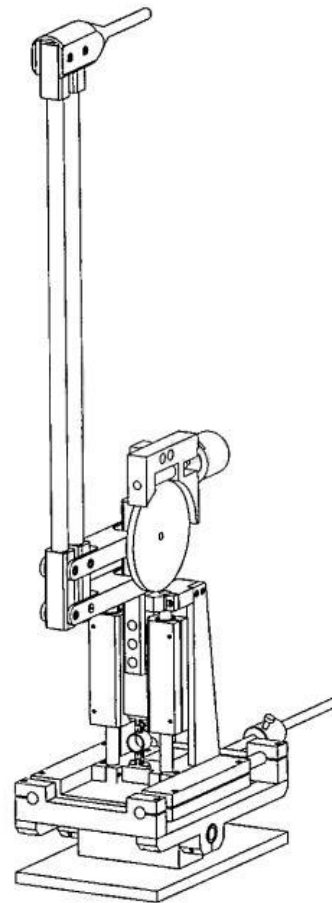


Fig. 1.3 Balanza de fuerzas de la RAU.

1.1.3 Túnel de viento del IPN

El túnel de viento subsónico, Armfield C2-00, del Instituto Politécnico Nacional (IPN) tiene, entre sus accesorios estándares, una balanza de fuerzas para medir arrastre y sustentación en pruebas de túneles de viento [6]. El túnel es de tipo abierto y cuenta con una cámara de prueba. La cámara de prueba es de 30 cm de ancho por 45 cm de alto y tiene una velocidad de viento máxima de 25 m/s (90 km/hr).



Fig. 1.4 Túnel de viento del IPN.

La balanza consiste en un par de brazos, soportados sobre cuchillas en ejes perpendiculares y paralelos al eje central del tunel. Las fuerzas de sustentación y arrastre son compensadas por pesas deslizantes a lo largo de los brazos hasta alcanzar un estado de equilibrio. Los brazos están graduados en Newtons, de manera que pueden ser leídos directamente. El rango de medición es de 0 – 7 N para la fuerza de sustentación y de 0 – 2.5 N para la fuerza de arrastre. La sensibilidad del instrumento es de ± 0.01 N.

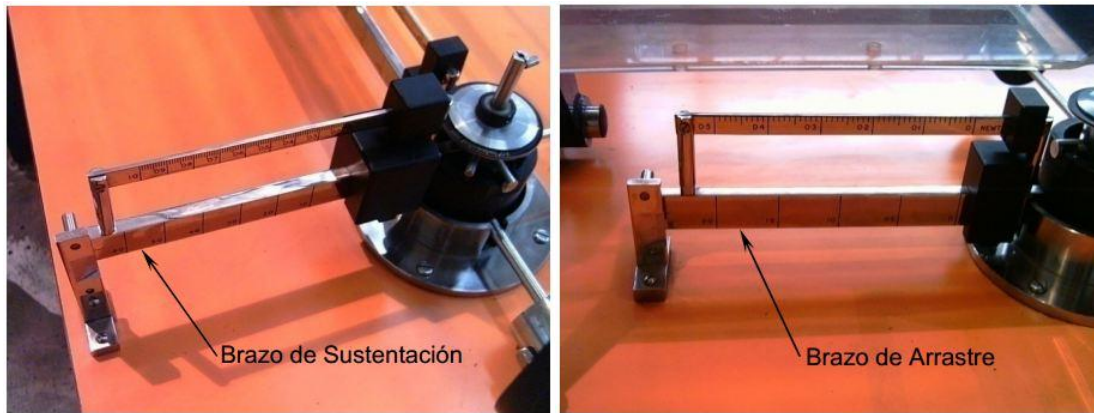


Fig. 1.5 Balanza de fuerzas del IPN.

1.1.4 Túnel de viento de la UNAM

En Febrero de 2015, se anunció la puesta en marcha de un túnel de viento subsónico en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [7]. Este túnel busca resolver problemas relacionados con la ingeniería de viento con el fin de desarrollar aplicaciones en ingeniería civil, arquitectura y meteorología. El túnel es de circuito cerrado y tiene dos cámaras de prueba. La cámara de prueba principal tiene dos mesas giratorias separadas entre sí por 14 metros. Al girar, las mesas simulan diferentes direcciones de incidencia del viento sobre modelos de estructuras civiles. La velocidad máxima generada dentro del túnel es de 27.78 m/s (100 km/hr).



Fig. 1.6 Túnel de viento de la UNAM.

Los modelos de prueba son equipados con sensores para medir la deformación, velocidad, aceleración, temperatura y presión producida por el viento.

Para concluir esta sección, se presenta un resumen de los artículos y trabajos consultados en esta investigación. En la tabla 1.1 se destacan las características más importantes de los sistemas de instrumentación que forman parte de los túneles de viento antes mencionados

y que sirven para medir las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre los modelos de estudio.

Túnel de viento subsónico

	Kirkwood HS – NASA	RAU/UJ	IPN	UNAM
Tipo de túnel	Abierto	Cerrado	Abierto	Cerrado
Velocidad de viento máxima	N/A	20.93 m/s	25 m/s	27.78 m/s
Aplicación	Perfiles alares	Vehículos aéreos	Mecánica de fluidos	Ingeniería de viento
Número de fuerzas aerodinámicas medidas	2	3	2	N/A
Rango de medición para la fuerza de sustentación	0 – 10 N	0 – 80 N	0 – 7 N	N/A
Rango de medición para la fuerza de arrastre	0 – 10 N	0 – 7 N	0 – 2.5 N	N/A
Rango de medición para el momento de cabeceo	N/A	0 – 7 N	N/A	N/A
Precisión de los sensores de fuerza	±0.01 N	±0.5 N	±0.01 N	N/A

Tabla 1.1 Instrumentación empleada por cada institución.

1.2 Justificación

1.2.1 Industria automotriz en Puebla

Un reciente estudio publicado por BBVA Bancomer Research, muestra el impacto de la industria automotriz en la economía Mexicana [8]. El artículo revela el peso de este sector en el Producto Interno Bruto (PIB) de cada entidad federativa del país. En el estado de Puebla, este sector contribuye con más del 25% del PIB local y genera el 4.5% de los

empleos de la región. Lo que convierte a la industria automotriz en el pilar económico más importante del estado.

Las universidades poblanas han demostrado un gran interés por preparar recursos humanos capacitados que puedan responder a las demandas de este sector. En 2013, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) anunció la creación de la Ingeniería en Sistemas Automotrices con sede en la Facultad de Ciencias de la Electrónica [9]. Esta carrera tiene como objetivo preparar futuros líderes en la planeación, producción y diseño de sistemas automotrices a través de la enseñanza de conocimientos en mecánica, aerodinámica, motores de combustión interna, entre otros. En el mismo año, la apertura del Laboratorio de Sistemas Automotrices consolidó la colaboración entre la armadora Volkswagen de México y la BUAP para realizar proyectos de investigación aplicada, desarrollo e innovación [10]. Este laboratorio tiene como meta el avance del conocimiento e investigación de vanguardia en ingeniería del automóvil.

La creación de instrumentos didácticos especializados que faciliten la enseñanza de la aerodinámica del auto es invaluable para la formación de recursos humanos competitivos para el mercado laboral poblano. Asimismo, ayudaría a la próxima generación de jóvenes estudiantes a tener un fundamento sólido del tema y colaborar en los proyectos que se lleven a cabo en la institución.

1.2.2 Producción de automóviles

En las últimas décadas el túnel de viento se ha convertido en una herramienta primordial en los programas de diseño de vehículos terrestres [11]. La necesidad de comprender y encargarse de los fenómenos relacionados con el flujo de aire ha incrementado significativamente el tiempo de pruebas requerido para respaldar las decisiones de diseño de trenes, autobuses, vehículos de pasajeros, motocicletas, camiones y autos de carreras de todo tipo.

Entre los resultados más importantes obtenidos de los experimentos en túneles de viento en programas de diseño automotriz se encuentran las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre vehículos de prueba dentro de un ambiente controlado [12]. Las mediciones de fuerzas y momentos son importantes para todos los vehículos terrestres. Para algunos, el interés principal es el arrastre por su reflejo en los requerimientos de energía. Para otros, tales como automóviles de alto desempeño, automóviles de carreras y motocicletas; los momentos, la sustentación y la fuerza lateral son tan importantes como el arrastre por su impacto en la controlabilidad y seguridad del vehículo.

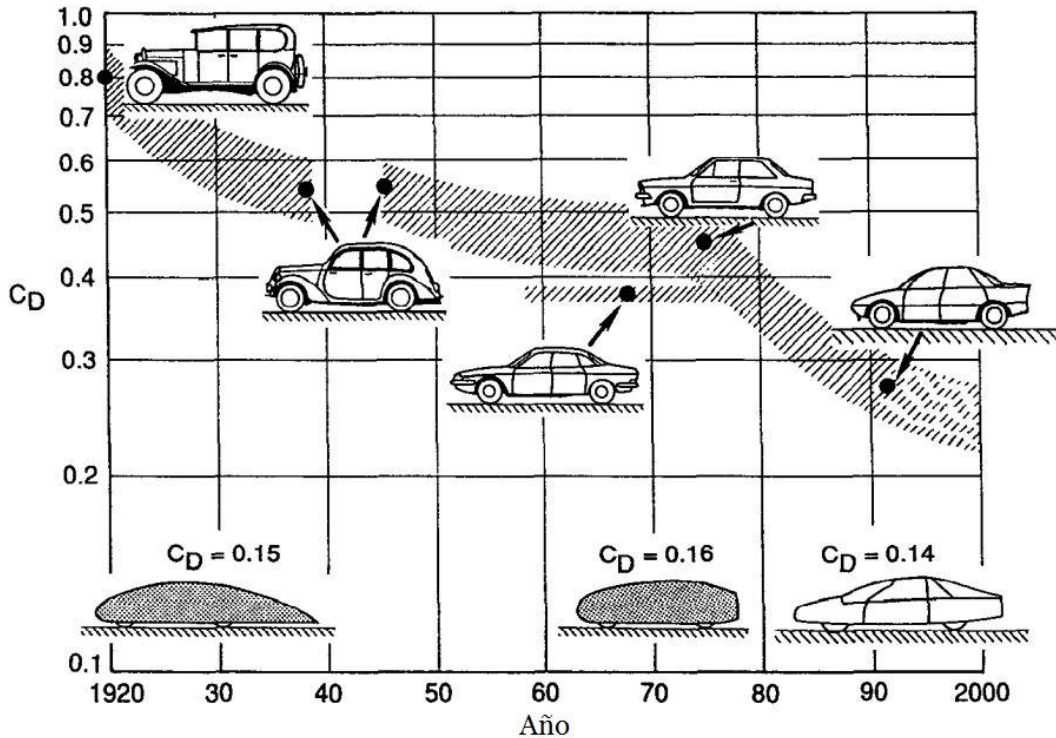


Fig. 1.7 La historia del arrastre en los automóviles.

Las fuerzas de arrastre y sustentación generadas en un tren de alta velocidad, por ejemplo, son fundamentales para determinar su seguridad, la velocidad de crucero máxima, y todos los aspectos subsecuentes (p. e., el tiempo de viaje y la eficiencia de combustible) que eventualmente afectan el precio del boleto. En el caso de las motocicletas los momentos y las fuerzas generadas en movimientos en línea recta y después de la exposición a vientos laterales tiene un efecto esencial en el rendimiento del vehículo y la seguridad del conductor. El arrastre es a menudo el componente que recibe la mayor atención por tener un efecto dominante en el consumo de combustible a una velocidad dada y sobre la velocidad máxima alcanzable.

La sustentación es de vital importancia para determinar la controlabilidad de autos de alto desempeño y autos de carreras, volviéndose crucial a medida que la velocidad aumenta. La sustentación es a menudo calculada en términos de la sustentación frontal y la sustentación trasera. Esto es equivalente a considerar la sustentación total y el momento de cabeceo.

1.2.3 Ingeniería de viento

La ingeniería de viento combina los campos de la meteorología, dinámica de fluidos, mecánica estructural y análisis estadístico para minimizar los efectos desfavorables del viento [13].

Las evaluaciones de componentes, estructuras individuales y grupos de estructuras son usadas frecuentemente para obtener información que respalde decisiones de diseño que aseguren la integridad estructural y resuelvan problemas de utilidad y seguridad. Las condiciones de viento que se presentan en la ciudad son una preocupación importante. De la misma manera, los patrones de concentración y dispersión de nieve, desechos y contaminantes son temas frecuentes de investigación.

Estructuras muy altas que son relativamente elásticas pueden experimentar una respuesta inducida por el viento tal que los efectos del viento impongan requerimientos significativos en las especificaciones estructurales. Edificios cuyos perfiles son inusuales son claros candidatos para análisis y posible simulación en túneles de viento para determinar si algunas cargas superficiales pueden exceder las expectativas de los lineamientos locales típicos. Se presta una atención especial si una estructura tiene el potencial de presentar movimientos dinámicos significativos. Edificios altos y esbeltos, puentes de gran extensión, plataformas marítimas, techos suspendidos por cables y líneas eléctricas y sus torres son ejemplos típicos. La falla estructural más celebre producida por el viento es, quizás, el puente Tacoma Narrows, el cual bajo la influencia de viento moderado y constante desarrolló una oscilación de larga amplitud que condujo a una separación total del tablero del puente del sistema de suspensión [14]. Una parte importante del proceso de falla del sistema fue captada en video. El video provee de evidencia dramática del poder potencial de la interacción de un viento relativamente moderado que activa el modo dinámico de una estructura susceptible.

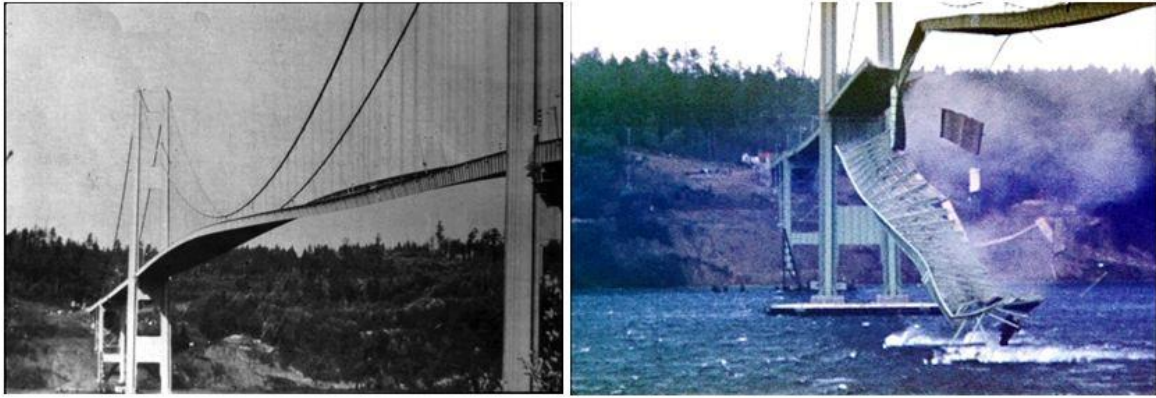


Fig. 1.8 Colapso del puente Tacoma Narrows en 1940.

Las simulaciones en túneles de viento están destinadas a proporcionar información sobre los efectos del viento en estructuras bajo condiciones especiales, esto es, una velocidad de viento y dirección específica relativa a la estructura y sus alrededores. En el caso de los estudios de la ingeniería de viento, existen factores implícitos del flujo entrante que son típicamente caracterizados por su topografía general pero pueden depender de la dirección, incluso para un sitio geográfico particular. Esto es verdad, por ejemplo, para una estructura localizada en la costa donde las características del viento entrante pueden diferir dependiendo de dónde proviene el viento, del lado del agua o de la tierra. La información obtenida de las simulaciones para velocidades y direcciones específicas es usada con los registros históricos de las condiciones de viento locales para predecir los efectos sobre las estructuras de escala real.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseño y puesta en marcha de un sistema de instrumentación para el túnel de viento subsónico del Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica (IDIT) de la Universidad Iberoamericana de Puebla.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Presentar una síntesis de la investigación sobre instrumentación en túneles de viento de baja velocidad y sus aplicaciones en vehículos terrestres e ingeniería de viento.

2. Diseñar una plataforma mecánica que permita determinar las fuerzas de arrastre y sustentación de modelos a escala de automóviles y edificios a través de sensores de fuerza integrados en la estructura.
3. Acoplar sensores en la cámara de ensayo para monitorear la velocidad, temperatura, humedad relativa y presión del aire.
4. Diseñar e implementar un instrumento virtual en LabVIEW® para editar los parámetros de los experimentos, almacenar los resultados y presentarlos al operador.

1.4 Diagrama a bloques

A continuación se presenta una descripción general del sistema de instrumentación.

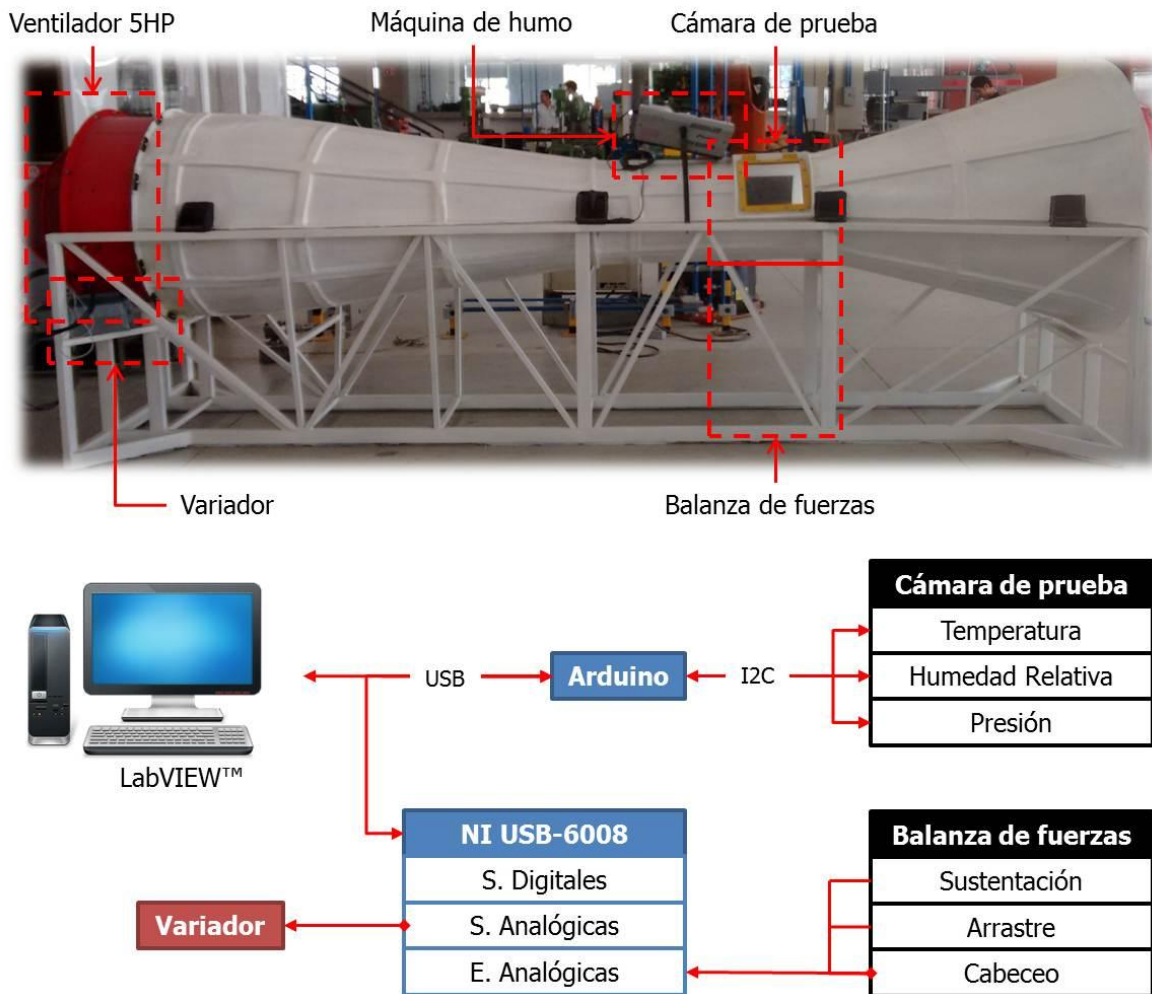


Fig. 1.9 Diagrama a bloques.

La balanza de fuerzas estará ubicada debajo de la cámara de prueba del túnel de viento y tendrá integrados tres sensores para medir las fuerzas de sustentación, arrastre y cabeceo de los modelos a escala. En el interior de la cámara de pruebas se colocarán sensores para medir las características físicas del fluido: temperatura, humedad relativa y presión.

Los sensores de fuerza son de tipo analógico y están conectados a una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008. Los sensores de temperatura, humedad relativa y presión son digitales y tienen una comunicación a través del protocolo I²C con una tarjeta Arduino basada en un microcontrolador ATMEGA328P. Asimismo, una salida analógica de la tarjeta NI USB-6008 estará conectada a la entrada analógica del variador para así regular la velocidad de rotación del motor y generar diferentes velocidades de viento en la cámara de prueba.

La tarjeta Arduino y la tarjeta NI USB-6008 se conectan por USB a una computadora. En esta computadora estará instalado un instrumento virtual desarrollado en LabVIEW el cual permitirá al usuario configurar los parámetros de la prueba y almacenar los resultados de los experimentos para su análisis posterior.

Capítulo 2. Principios básicos de aerodinámica

El objetivo de este capítulo es familiarizar al lector con los fenómenos aerodinámicos básicos para eventualmente entender los mecanismos que generan las fuerzas aerodinámicas sobre un automóvil en movimiento.

Comenzaremos con una descripción de las fuerzas de fricción que actúan de forma paralela a la superficie del vehículo y contribuyen al arrastre. Además de estas fuerzas de tipo cortante, existe otro mecanismo que crea fuerzas en el aire en movimiento, la presión. En cualquier momento en que el aire se mueve alrededor de un cuerpo la presión cambia ligeramente. Este cambio crea una distribución desigual de presiones en el cuerpo que contribuye al arrastre y sustentación del vehículo.

2.1 Definiciones

2.1.1 Líneas de corriente

Las **líneas de corriente** son curvas asociadas con una descripción pictórica de un fluido en movimiento. Esta definición está relacionada con las líneas de humo que se muestran en el flujo de aire cerca de la superficie de los vehículos en los experimentos en túneles de viento. Si nuestro vehículo se está moviendo hacia delante a una velocidad constante, el flujo se denomina de régimen estacionario. En este caso las partículas de aire se moverán a lo largo de las líneas de corriente, las cuales son paralelas a la dirección de la velocidad.

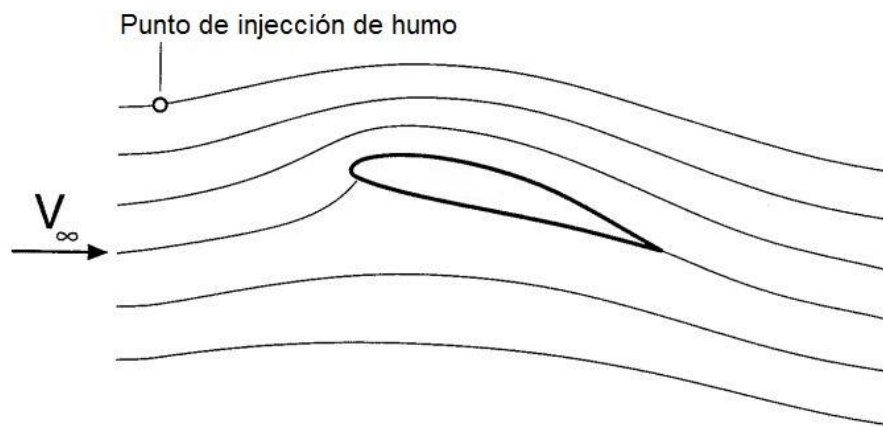


Fig. 2.1 Líneas de corriente en un flujo de régimen estacionario sobre un perfil alar.

Al observar varias líneas de corriente en el flujo, es posible ver si el flujo sigue la forma del cuerpo del vehículo cerca de su superficie. Cuando las líneas de corriente cercanas a la superficie siguen exactamente la forma del cuerpo, se considera que el flujo está **adherido**. Si el flujo no sigue la forma de la superficie, se considera que el flujo está **separado**. En general, el flujo separado hace que el vehículo deje una estela turbulenta tras de sí. Como se verá más adelante, es extremadamente importante tener campos de flujo adheridos para reducir el arrastre aerodinámico y/o incrementar la carga aerodinámica.

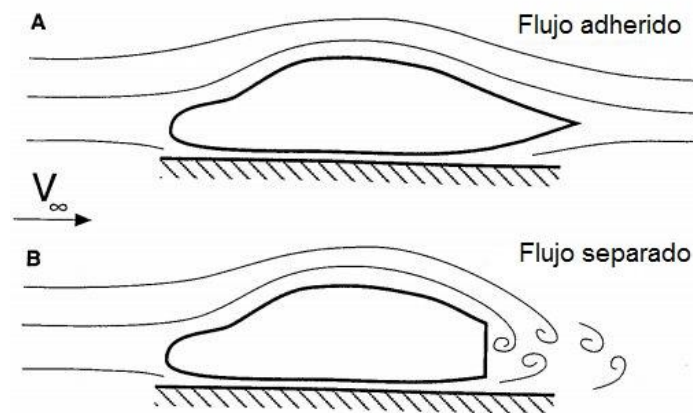


Fig. 2.2 Flujo adherido sobre las líneas de corriente de un automóvil (A), y el flujo separado en la parte trasera de la forma de un automóvil más realista (B).

2.1.2 Distribución de la velocidad

Cuando un vehículo se mueve a través del aire, su forma perturba las partículas de aire de tal forma que su velocidad no es igual en todos los puntos del flujo. Los diagramas de distribución de aire (o perfiles de velocidad) son usados con el fin de describir la magnitud de la velocidad de las partículas de aire al pasar alrededor de un objeto. Para ilustrar la distribución de aire en un plano, se considera un flujo libre de velocidad constante (Fig. 2-3).

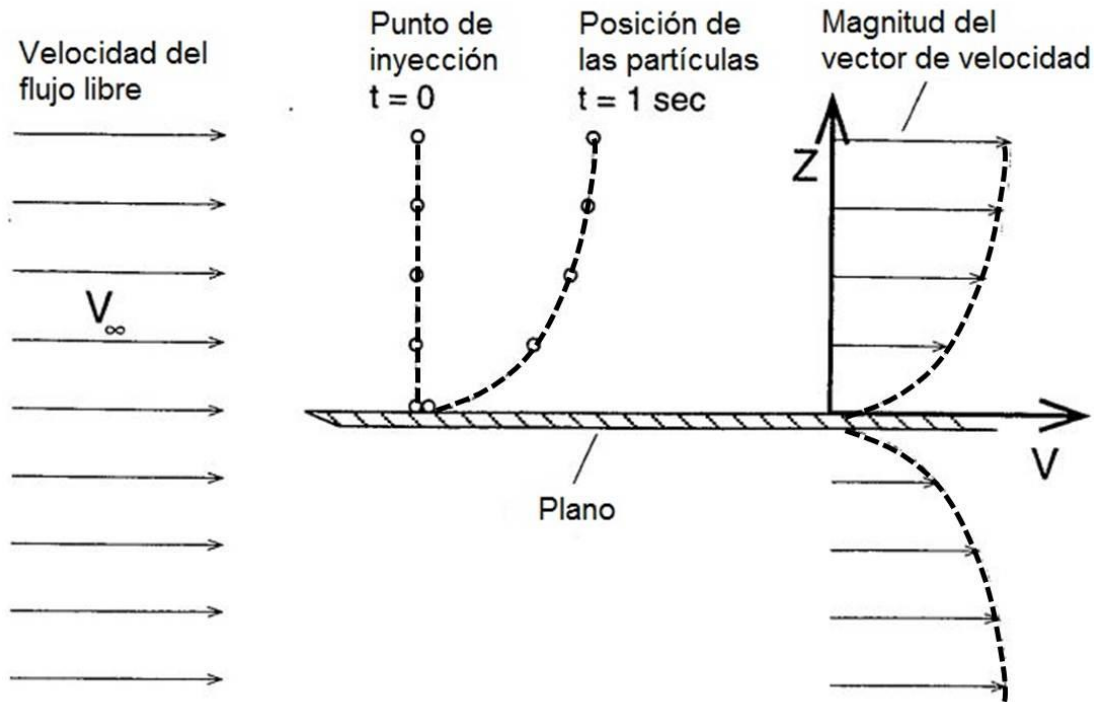


Fig. 2.3 Vista lateral de la distribución de velocidad cerca del plano en un flujo libre.

El plano produce una perturbación, incluso si éste es paralelo a la dirección del flujo. Esta perturbación puede ser visualizada al inyectar humo a lo largo de una rejilla vertical. Después de un corto periodo de tiempo (e.g. 1 segundo) podemos registrar la posición de las partículas inyectadas, y al conectar estos puntos con los puntos de inyección de humo, crear una descripción visual de la magnitud de la velocidad.

Este diagrama comúnmente describe el cambio en la velocidad del fluido a lo largo de la línea vertical (ordenada z) y la magnitud de la velocidad (V) se grafica paralela a la abscisa (dirección del flujo libre) en este diagrama. Por lo tanto, este diagrama describe la **distribución de velocidad** sobre la superficie superior del plano, a lo largo de la línea que conecta los puntos de inyección de humo.

Podemos observar algunas características interesantes en la Fig. 2.3. Primero, la velocidad del aire cerca de la superficie se detiene abruptamente, esto se conoce como “condición de no deslizamiento”. Las partículas del fluido que tocan el cuerpo *se adhieren* a su superficie; ya que no tienen velocidad relativa. A medida que crece la distancia entre el cuerpo y las partículas, su velocidad aumenta hasta llegar al mismo valor de la velocidad del flujo libre. Esta capa delgada de partículas se denomina **capa límite**.

2.1.3 Flujo laminar y turbulento

Cuando las partículas de aire son paralelas y siguen la dirección de la velocidad promedio, y el movimiento del fluido parece estar “bien organizado”, entonces el flujo se denomina **laminar**. Sin embargo, es posible tener la misma velocidad promedio en el flujo y que las partículas del fluido se muevan momentáneamente en otra dirección. En este caso, el flujo se considera **turbulento** (a pesar de que la velocidad promedio sea la misma para ambos tipos de flujo).

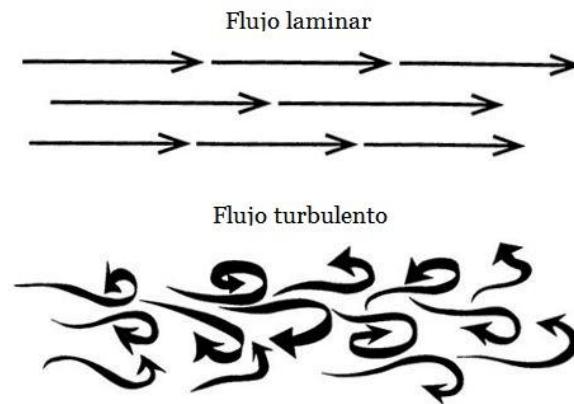


Fig. 2.4 Rastro de partículas en un flujo laminar y turbulento.

Para los ingenieros de automóviles de competición es muy importante conocer cuándo un flujo es laminar o turbulento ya que características como el flujo separado y el arrastre o la sustentación pueden cambiar dramáticamente entre estos dos flujos.

2.2 Propiedades de los fluidos

Las cargas ejercidas sobre un vehículo que se mueve a través del aire, o sobre un modelo de escala reducida en un túnel de agua, dependen de las propiedades del fluido (e.g., temperatura, presión, densidad, viscosidad, etc.). La densidad (masa por unidad de volumen) es familiar para todos nosotros, todos sabemos que una barra de acero es más pesada que una de madera del mismo tamaño. Cuando usamos nuestras ecuaciones a la densidad se le designa el símbolo griego rho, ρ . La viscosidad es, en general, una medida de la resistencia del fluido al movimiento (similar a la fricción), y se designa por el símbolo griego μ .

2.2.1 Viscosidad

El efecto de la viscosidad en un fluido puede ser demostrado con un experimento sencillo (Fig. 2.5) donde un fluido viscoso se confina entre dos superficies paralelas. La superficie inferior es estacionaria, mientras que la superior se mueve a la derecha a una velocidad constante. Las partículas del fluido cerca de las dos paredes tienden a *pegarse* a la superficie sólida y mantener una velocidad relativa cero.

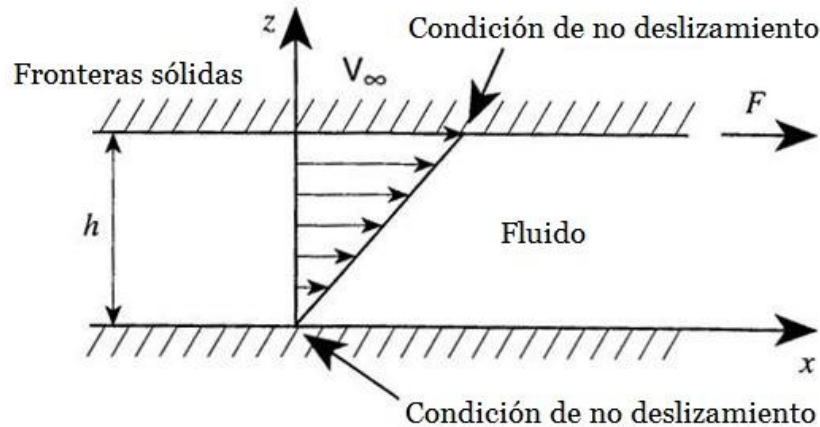


Fig. 2.5 Distribución de la velocidad entre dos planos paralelos, causada por el movimiento del plano superior. El plano inferior es estacionario, y el superior se mueve a causa de la fuerza F a una velocidad constante V_∞ .

A medida que la superficie superior se mueve con respecto a la inferior, el fluido desarrolla un esfuerzo cortante, y las moléculas son forzadas a moverse unas respecto a las otras. La resistencia del fluido al esfuerzo cortante resulta en la fuerza F , la cual debe ser aplicada a la superficie móvil para mantener el movimiento. La distribución de la velocidad entre los muros es lineal a causa de la condición de no deslizamiento. Entonces, para un observador parado sobre la superficie inferior, la velocidad del fluido parecerá ser cero en la superficie estacionaria e igual a la velocidad del plano en la superficie superior. Este experimento puede ayudarnos a definir la viscosidad simplemente midiendo la **fuerza cortante** requerida para desplazar el plano superior. Es evidente que, a medida que la viscosidad aumenta, la fuerza cortante (responsable de la fricción de arrastre) incrementará también.

Debido a nuestro interés en los túneles de viento, nos enfocaremos exclusivamente en las propiedades del aire.

2.2.2 Propiedades del aire

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, y varios otros gases presentes en cantidades pequeñas. La ecuación de estado del gas ideal se escribe como:

$$p = \frac{\rho RT}{M} \quad (2.1)$$

Donde R es la constante universal de los gases y M es el peso molecular de la mezcla. La presencia de vapor de agua afecta significativamente al peso molecular de la mezcla. Después de un extenso análisis, Jones [15] propone una ecuación para calcular la densidad del aire (ρ) en función de la temperatura (T), la presión (p), la humedad relativa (R_h) y la saturación efectiva de la presión del vapor de agua (e_s):

$$\rho = \left(\frac{0.0034847}{T} \right) (p - 0.003796 R_h e_s) \quad (2.2)$$

La constante que se encuentra sobre la temperatura (T) en la ecuación anterior es el recíproco de la constante universal de los gases (R) y tiene por unidades $\text{kg}^\circ\text{K}/\text{N}\cdot\text{m}$. La densidad de aire (ρ), en el sistema internacional de unidades (SI), se mide en kg/m^3 .

La saturación efectiva de la presión del vapor de agua (e_s) tiene por unidad de medida los Pascales y se relaciona con la temperatura a través de:

$$e_s = (1.7526 \times 10^{11}) e^{(-5315.56/T)} \quad (2.3)$$

La tabla 2.1 resume algunas propiedades del aire en condición *estándar*.

Temperatura T 59°F = 518.67°R = 15°C = 288.16°K		
Densidad, ρ	0.002378 slug/ft ³	1.225 kg/m ³
Presión, p	2116 lb/ft ²	101,325 Pa (N/m ²)
Viscosidad, μ	3.74×10^{-7} lb-sec/ft ²	1.791×10^{-6} kg/m-sec
Viscosidad cinemática, ν	1.55×10^{-4} ft ² /sec	1.44×10^{-5} m ² /s
Constante de gases, R	1714.9 ft-lb/slug-°R	287 N-m/kg-°K

Tabla 2.1 Aire en condición “estándar”.

2.3 Capa límite

El concepto de capa límite puede ser descrito considerando el paso de flujo en un plano bidimensional sumergido en un flujo uniforme (Fig. 2.3) [16]. Como se mencionó, la velocidad sobre la superficie de un plano estacionario se vuelve cero a causa de la viscosidad del fluido, al tiempo que se forma una delgada capa donde la velocidad paralela al plano alcanza gradualmente la velocidad exterior V_0 . En este caso V_0 denotará la velocidad del fluido fuera de la capa límite, para el caso del plano ésta es igual a la velocidad del flujo libre $V_0 = V_\infty$.

Esta capa de cambio rápido en la velocidad tangencial se denomina **capa límite**, y su espesor δ (delta) *incrementa* con la distancia a lo largo del plano. La capa límite también se forma en perfiles más complejos, como los automóviles (Fig. 2.6).

El espesor de esta capa límite es solo de algunos milímetros en la parte frontal del auto cuando este viaja a 100 km/hr, pero puede llegar a ser de varios centímetros de espesor al llegar a la parte trasera del vehículo. Una capa límite más gruesa produce más arrastre de fricción viscoso. Más aún, un incremento brusco en este espesor puede conducir a la separación del flujo, resultando en un arrastre adicional y una pérdida de carga aerodinámica.

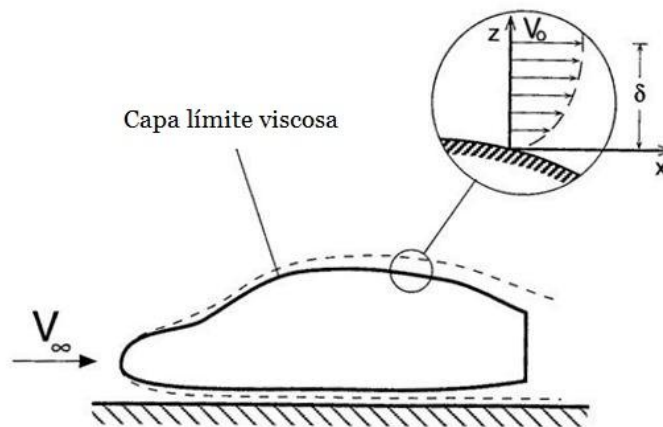


Fig. 2.6 Capa límite cerca de la superficie de un vehículo, y la distribución de la velocidad típica dentro de esta capa.

2.4 La ecuación de Bernoulli

Daniel Bernoulli (Matemático suizo-holandés, 1700-1782) estableció la relación entre la presión y la velocidad del aire. Esta ecuación declara que si la velocidad del aire varía a medida que fluye alrededor de un objeto, entonces la presión cambiará en proporción

inversa al cuadrado de la velocidad del aire [17]. En otras palabras, entre más rápido fluya el aire alrededor del vehículo, menor será la presión. A lo largo de cualquier punto sobre una línea de corriente, la relación entre la presión local estática p , densidad ρ y la velocidad V es:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = cte \quad (2.4)$$

El valor de la constante no es realmente importante dado que la ecuación sólo se utiliza para comparar la velocidad y presión del flujo entre dos puntos.

2.4.1 Aplicación de la ecuación de Bernoulli

Para entender la importancia de esta ecuación, consideremos el flujo sobre un vehículo que se mueve hacia el frente a una velocidad V_∞ (Fig. 2.7). La velocidad del aire aumenta cerca del cuerpo ya que el vehículo deforma las líneas de corriente. Podemos escribir la ecuación 2.4 para un punto que se encuentra alejado del automóvil hacia el frente (cualquier punto cerca del ∞ , hacia la izquierda) y para un segundo punto que se encuentra sobre el cuerpo (punto A). Dado que la constante de la ecuación 2.4 es la misma para los dos puntos:

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{V_\infty^2}{2} \quad (2.5)$$

En este caso las cantidades con subíndice A, representan las variables medidas en el punto A. Entonces, si conocemos la presión ambiental p_∞ , la velocidad del vehículo V_∞ y la presión estática p_A cerca de la superficie podemos calcular la velocidad del aire local V_A .

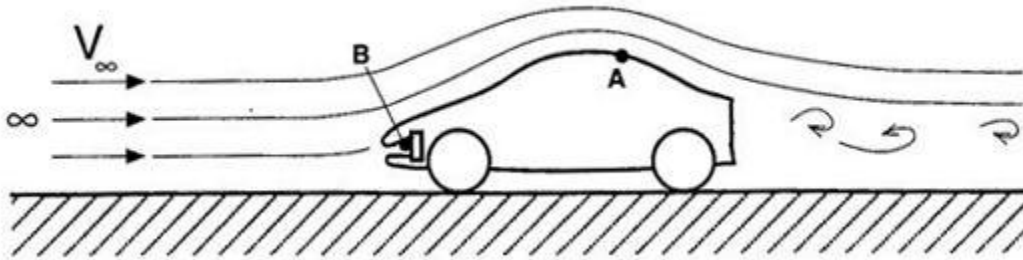


Fig. 2.7 Ejemplo usado para describir la aplicación de la ecuación de Bernoulli.

Una conclusión importante, que se deduce de la ecuación de Bernoulli, es que para generar carga aerodinámica sobre el vehículo, debemos hacer que la corriente del aire fluya más

rápido debajo del auto que sobre su superficie. La disminución de la presión en la parte inferior del vehículo daría como resultado un aumento en la carga aerodinámica del automóvil.

2.5 Coeficiente de presión

El coeficiente de presión se utiliza para conocer la distribución de la presión sobre la superficie de un objeto. En general, se utiliza en lugar de la presión real ya que carece de unidades. La ecuación para calcular el coeficiente de presión C_p es la siguiente:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho V_\infty^2} \quad (2.6)$$

Es posible poner el coeficiente de presión en términos de la velocidad local, usando la relación $p - p_\infty = \frac{1}{2} \rho (V_\infty^2 - V^2)$ que se deriva de la ecuación de Bernoulli. Cambiando el numerador por la expresión anterior obtenemos:

$$C_p = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2} \quad (2.7)$$

En la tabla 2.2 se muestran algunos valores típicos para el coeficiente de presión. En primer lugar, en el *punto de estancamiento* (punto B en la Fig. 2.7) donde la velocidad es cero, obtenemos $C_p = 1.0$. En segundo lugar, en un punto sin perturbaciones, lejos del vehículo donde $p = p_\infty$ obtenemos $C_p = 0$. Finalmente, si la velocidad local es mayor que la velocidad de flujo libre (V_∞) entonces C_p se vuelve negativo.

Ubicación	Velocidad	C_p
Punto de estancamiento	0	1.0
Sobre el vehículo	Si V es menor que V_∞	0 a 1.0
Sobre el vehículo	Si V es mayor que V_∞	Negativo

Tabla 2.2 Valores típicos del coeficiente de presión (C_p).

2.5.1 Distribución de presión sobre los cuerpos

Ahora observaremos la influencia de la forma del cuerpo en la distribución de velocidad y presión. Discutiremos el caso hipotético de un hemisferio sumergido en un flujo uniforme. Los resultados se presentan en la Fig. 2.8, donde la velocidad y la presión se grafican a lo largo del eje central del hemisferio, θ es la medición de la posición angular sobre el cuerpo. Al frente del hemisferio, cerca del suelo, hay un punto de estancamiento ($V = 0$, y $C_p = 1.0$), y en la parte más alta del hemisferio la velocidad es la mayor y el coeficiente de presión es el menor. Debido a que este cuerpo es simétrico, habrá otro punto de estancamiento en la parte trasera del hemisferio. En conclusión, en términos muy generales, la velocidad incrementa a la par del grueso (o altura) del cuerpo; de forma similar la presión disminuye, de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. Por esta razón, el coeficiente de presión aparece en la Fig 2.8 con un signo menos a fin de que la velocidad y la presión puedan ser graficadas en el mismo diagrama.

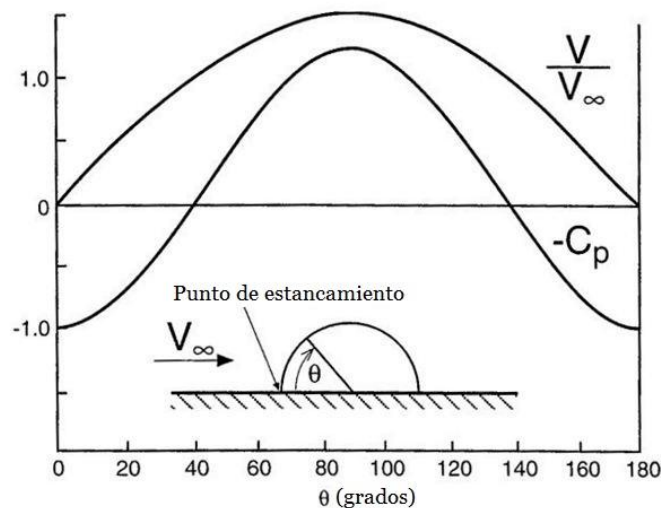


Fig. 2.8 Distribución de velocidad y coeficiente de presión negativo sobre el eje central de un hemisferio sumergido en un flujo uniforme V_∞ , θ es la medición de la posición angular sobre el eje central.

2.5.2 Distribución de presión sobre el perfil de un automóvil

En esta sección discutiremos la distribución de presión sobre perfiles de automóviles. Primero, resumiremos algunas características importantes de la sección anterior. Cuando el flujo cambia de dirección al pasar por una superficie cóncava (al frente del hemisferio en la Fig 2.8), la velocidad disminuye y la presión aumenta. Por otro lado, cuando el flujo

cambia de dirección alrededor de una superficie convexa (parte superior del hemisferio), la velocidad aumenta y la presión disminuye.

Ahora usaremos la Fig. 2.9 para observar cómo afecta la forma de un perfil a la distribución de presión en un automóvil. Las características básicas de esta distribución de presión siguen siendo similares a aquéllas de la Fig. 2.8. Hay un punto de estancamiento al frente del vehículo $C_p = 1.0$, ya que la forma de la superficie es cóncava. Después, el flujo acelera sobre el toldo y C_p se vuelve negativo, debido a que la forma de la superficie se puede clasificar como convexa en ese punto. En la base del parabrisas el flujo disminuye su velocidad otra vez (cóncavo) y la presión aumenta. El flujo vuelve a acelerar sobre la parte superior del vehículo (convexo), donde se observa el valor más bajo de la presión. La secuencia se invierte conforme nos acercamos a la parte trasera del vehículo. Sin embargo, la presión no alcanza el valor $C_p = 1.0$, como en el ejemplo anterior. Esto se debe a que el flujo se separa del vehículo.

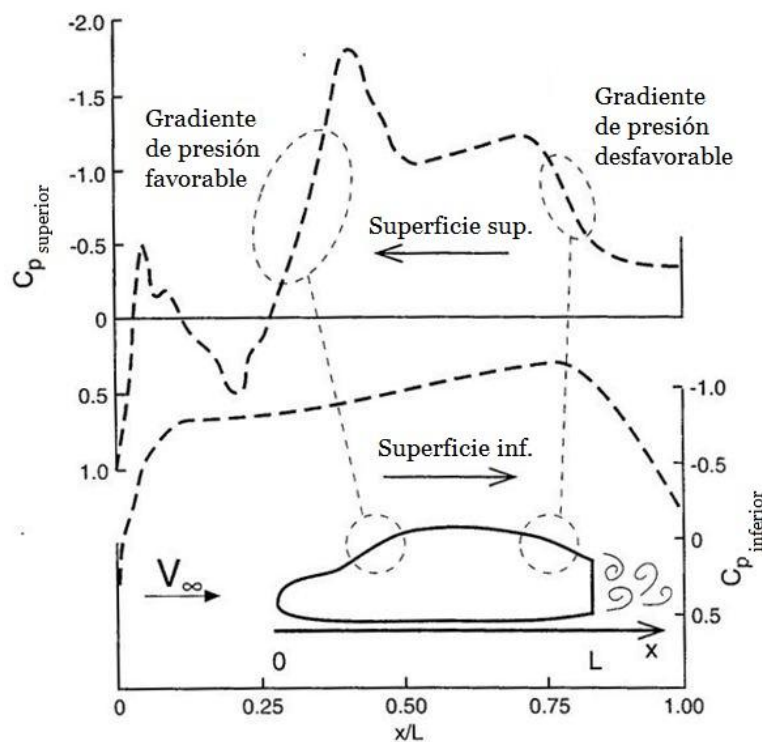


Fig. 2.9 Distribución de coeficientes de presión medidos sobre el perfil de un automóvil bidimensional.

La distribución de la presión en la parte inferior del vehículo también se muestra en la Fig. 2.9. Del mismo modo, la presión en la parte trasera no recupera el valor del punto de estancamiento ($C_p = 1.0$). Como resultado de la separación del flujo, las presiones de la

parte trasera del auto son menores que las del frente, lo que ocasiona que se produzca arrastre. A este componente del arrastre, que resulta de las separaciones de flujo, se denomina **arrastre de forma**.

Capítulo 3. Fuerzas aerodinámicas

En el capítulo anterior se mostró que existen dos categorías básicas de fuerzas aerodinámicas actuando sobre el vehículo. La primera es la presión, que actúa normal (perpendicular) a la superficie y es responsable de la sustentación y parte del arrastre del vehículo. La segunda fuerza es la fuerza cortante (p. e. fricción), que actúa paralela a la superficie del cuerpo y sólo contribuye al arrastre.

3.1 Arrastre, sustentación y fuerza lateral

El sistema de referencia estándar usado en el estudio de la dinámica de los automóviles se presenta en la Fig. 3.1 [18]. De acuerdo con este sistema de referencia, existen tres fuerzas y tres momentos sobre el vehículo. En esta sección nos enfocaremos solamente en las dos fuerzas más comunes; sustentación y arrastre.

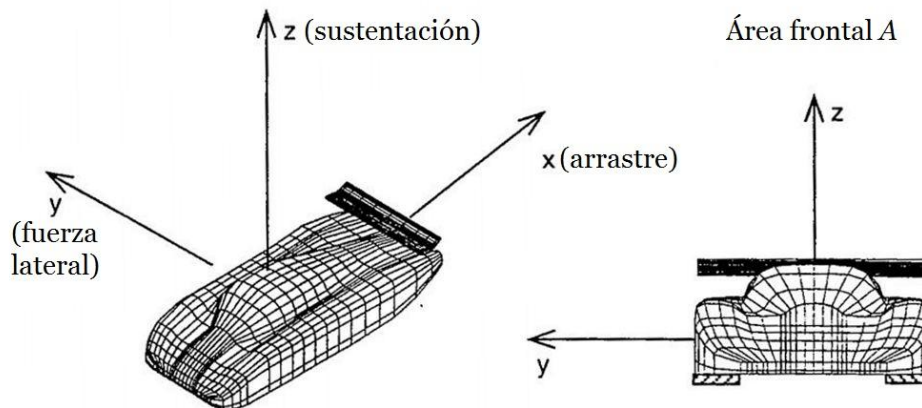


Fig 3.1 Sistema de coordenadas usado para definir las direcciones de las cargas aerodinámicas sobre un vehículo, y el área frontal utilizada para definir los coeficientes de fuerza.

La dirección de la fuerza de arrastre es paralela al movimiento del vehículo y apunta hacia la parte trasera del vehículo (dirección en x); la fuerza lateral es positiva, en dirección y ; mientras que la sustentación se ejerce hacia arriba, normal al suelo (dirección en z). La carga aerodinámica es igual a la sustentación negativa y actúa en la dirección $-z$.

La idea básica detrás de la definición de coeficientes adimensionales para la sustentación y el arrastre es que el valor de los coeficientes será independiente de la velocidad y estará relacionado exclusivamente con la forma del vehículo. La definición del coeficiente de sustentación (C_L) y del coeficiente de arrastre (C_D) es la siguiente [19]:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3.1)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (3.2)$$

Donde:

- L , es la fuerza de sustentación.
- D , es la fuerza de arrastre.
- ρ , es la densidad de aire (1.225 kg/m^3).
- V , es la velocidad del viento.
- A , es el área de referencia.

El área de referencia usada en aplicaciones automotrices es usualmente el área frontal del vehículo (Fig. 3.1). En algunos casos, los fabricantes de autos miden de forma muy precisa la sombra frontal del auto mientras que algunos otros usan una definición más libre para su área de referencia. No es raro encontrar diferentes valores de los coeficientes aerodinámicos para un mismo vehículo y una desviación del 5% en la información es muy común.

3.2 Coeficientes de arrastre y sustentación para varios vehículos de carretera

Podemos dividir las formas de los vehículos de carretera en dos categorías básicas. Están aquellos diseñadores que hacen un gran esfuerzo para bloquear el flujo de aire debajo del vehículo y otros pocos quienes intentan hacer pasar tanto aire como sea posible debajo del auto. Ambas escuelas de diseño pueden crear coeficientes de arrastre razonablemente bajos. Sin embargo, si se busca generar una alta carga aerodinámica entonces el último enfoque es inevitable. Esto empezó a influenciar significativamente el diseño de autos de competición a finales de 1970 y de nuevo a finales de 1980.

	Año/Automóvil	C_D	C_L
Sedanes	1973 Opel Record	0.47	0.36
	1980 Peugeot 305 GL	0.44	0.44
	1986 Subaru XT	0.29 – 0.31	0.10
Autos deportivos	Porsche 911 Carrera	0.38 – 0.39	---
	1982 Camaro Z28	0.37 – 0.38	---
	1982 Corvette	0.36 – 0.38	---
Autos de carreras	1990 Mazda GTO (rear deck spoiler)	0.51	-0.44
	1991 Mazda GTO (rear wing)	0.48	-0.53
	1973 Porsche 917/30	0.57	-1.04
	1985 Generic Prototype	0.74	-1.79
	Generic Porsche 962 C	0.80	-4.80
	1992 Mazda RX-792P	0.70	-3.80
	1992 Nissan P35, C	0.50	-3.00
	1983 generic F1, no sidepods	1.07	-0.99
	1987 March INDY	1.06	-1.71
	1991 Penske PC20, high downforce	1.11	-3.33
	1991 Penske PC20, speedway	0.740	-2.073
	1992 Galmer G92, high downforce	1.397	-3.688
	1992 Galmer G92, speedway	0.669	-1.953

Tabla 3.1 Coeficientes de arrastre y sustentación para varios vehículos de carretera.

Una lista de los coeficientes aerodinámicos para vehículos de carretera, recopilada por J. Katz [12], se muestra en la Tabla 3.1. Es importante enfatizar que la tabla de arriba sólo demuestra el rango típico de los coeficientes aerodinámicos. Debido a una gran variación en técnicas experimentales e instalaciones, se puede esperar una gran variación en la información, y dos vehículos sólo pueden ser comparados de forma justa si sus coeficientes fueron evaluados en las mismas instalaciones.

3.3 Balanzas de fuerza

En la sección anterior se introdujeron los componentes principales en los que se divide la carga aerodinámica de un vehículo (Fig. 3.1). Una balanza para túnel de viento es un dispositivo de medición de carga que separa estas fuerzas y calcula con precisión lo que casi siempre son pequeñas diferencias entre grandes fuerzas. En general, este tipo de aparatos están aislados del túnel de viento con el fin de registrar cargas exclusivamente producidas por la corriente de aire.

Existen dos tipos principales de balanzas, balanzas internas y externas. Las balanzas externas miden las fuerzas a través de palancas o cables conectados a un modelo de prueba que está dentro del túnel de viento. Las balanzas internas son sondas que se introducen en el modelo de prueba y están diseñadas para medir las fuerzas y momentos usando galgas extensiométricas.

La mayoría de las balanzas externas usadas en túneles de viento pueden dividirse en cuatro tipos, según la forma en que miden las fuerzas en el modelo. Estas balanzas toman su nombre a partir del miembro principal que soporta la carga –cable, plataforma, yugo y piramidal– y se describirán brevemente a continuación.

3.3.1 Balanza de cable

La balanza de cable fue uno de los primeros tipos de balanzas para túneles de viento. El modelo se montaba invertido de tal forma que la fuerza de sustentación se agregara a su peso, lo que prevenía *descargar* los cables ya que la tensión resultante nunca debería disminuir hasta cero. Los cables tendían a romperse, lo cual ocasionaba la pérdida del modelo. Las balanzas de cable resultaron ser menos robustas y versátiles que las demás alternativas y no han sido utilizadas desde los primeros días de la aeronáutica.

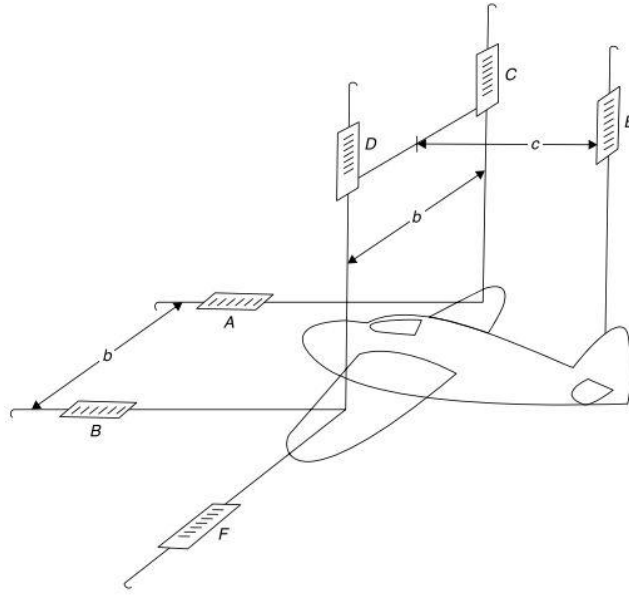


Fig. 3.2 Diagrama de una balanza de cable.

3.3.2 Balanza de plataforma

Las balanzas de plataforma son ampliamente utilizadas. Resistentes y naturalmente ortogonales, pueden ser construidas y alineadas con un mínimo de dificultad. Sin embargo, cuentan con algunas desventajas:

- Los momentos aparecen como pequeñas diferencias entre fuerzas muy grandes.
- El centro de la balanza no corresponde al centro del modelo por lo que el momento de cabeceo debe ser transferido.
- La fuerza de arrastre y la fuerza lateral se suman a los momentos de cabeceo y rotación.

Estas interacciones deben ser restadas de los datos finales.

3.3.3 Balanza de yugo

La balanza de yugo ofrece una ventaja sobre la balanza de plataforma ya que centro de la balanza coincide con el centro del modelo. Sin embargo, este diseño conduce a mayores desviaciones que en la balanza de plataforma, particularmente en el cabeceo y la fuerza lateral. Debido a que la estructura debe abarcar la sección de prueba a fin de poner los dos brazos superiores de arrastre en su posición, el brazo de palanca de la guiñada (*yaw*) es muy largo. Los pilares de soporte superiores están sujetos a grandes desviaciones. Otra vez, las fuerzas finales deben ser modificadas para tomar en cuenta estas interacciones.

3.3.4 Balanza piramidal

La mayoría de las desventajas de las balanzas de plataforma y yugo son ingeniosamente superadas por la balanza piramidal. Sin embargo, ésta agrega nuevas dificultades.

Ventajas:

- La balanza piramidal mide los momentos en el centro del modelo. Los seis componentes son separados y medidos por seis sensores de medición.
- Ningún componente tiene que ser sumado, restado o multiplicado.
- El problema de medir pequeñas diferencias entre grandes fuerzas es eliminado, y la lectura directa de las fuerzas y momentos simplifica los cálculos.

Desventajas:

- La alineación de la armadura (*riostra*) es tan importante que la construcción y la calibración de la balanza es muy complicada. Más aún, cualquier desviación de la armadura podría provocar la pérdida de la alineación, de tal forma que la medición de los momentos ya no sería precisa.
- La manera en que la balanza piramidal separa los momentos no es sencilla. Y le corresponde al ingeniero o estudiante acercarse al equipo usando un sistema de soporte.

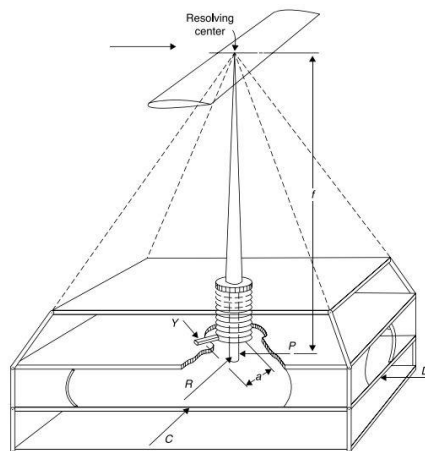


Fig. 3.3 Balanza piramidal.

3.4 Correcciones en los experimentos de túneles de viento

El siguiente ejemplo demuestra el problema que surge al tratar de hacer coincidir el tamaño del túnel de viento con el del modelo. En la Fig.3.4 – A un cuerpo aerodinámico se

mueve a través de un flujo de aire libre, causando que las líneas de corriente cercanas se deformen por su presencia. Esta perturbación del flujo es local; lejos del cuerpo las líneas de corriente no estarán afectadas y permanecerán paralelas y rectas. Si este cuerpo se coloca dentro de dos paredes, Fig. 3.4 – B, entonces el confinamiento obliga a las líneas de corriente a ajustarse a la forma de la pared. En la práctica, tener una pared muy cercana provocará que el flujo se mueva más rápido en el espacio entre el modelo y la pared, generando mayores mediciones en la sustentación y el arrastre. Así, la primera parte del problema es que se desea la mayor sección de pruebas posible para reducir los efectos de las paredes en un esfuerzo por obtener resultados más cercanos a las condiciones de carretera.

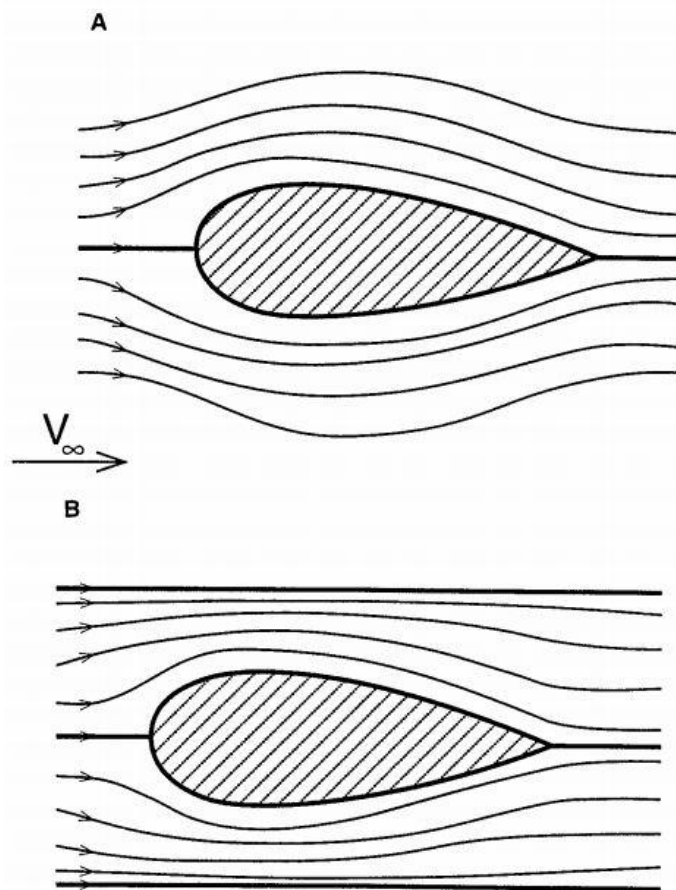


Fig. 3.4 Líneas de corriente cerca de un cuerpo en una corriente libre (A), y cuando está confinado por dos paredes rígidas (B).

La otra parte del problema es el tamaño del modelo, el cual debería ser el más pequeño posible. Sin embargo, los diseñadores prefieren modelos más grandes (incluso de escala real) para así incorporar más detalles en los modelos. Si se usa el auto real, entonces tiene

detalles como radiadores y ductos de enfriamiento, los cuales no podrían ser reproducidos de forma precisa a pequeña escala. No obstante, aunque el auto se encuentre en las primeras etapas de diseño y no exista, el modelo tiene que ser preparado.

Para un mínimo de interferencia entre el modelo y las paredes de un túnel de viento dado, el tamaño del modelo debe permanecer tan pequeño como sea posible, pero desde el punto de vista del detalle y precisión del modelo su tamaño debería de ser tan grande como sea posible. Siempre existe un compromiso entre los requerimientos del diseñador y el túnel de viento disponible, en la mayoría de los casos el efecto de las paredes en la sección de pruebas no puede ser ignorado.

La interferencia más obvia entre el modelo y la sección de prueba de un túnel de viento se denomina **bloqueo sólido**. Ya que la velocidad local en la sección de prueba es mayor de la que sería en una corriente de aire libre fuera del túnel de viento, **los coeficientes aerodinámicos están sobrestimados**. En consecuencia, se utilizan “correcciones para túneles de viento” para las mayores relaciones de bloqueo.

La mayoría de los métodos para corregir los efectos de las paredes en un túnel de viento están basados en la relación entre el área frontal del modelo (A) y la sección transversal de la cámara de prueba del túnel de viento (C). Una de las ecuaciones más sencillas para corregir el bloqueo en una sección de prueba es [12]:

$$\frac{\left(\frac{1}{2}\rho V^2\right)_c}{\left(\frac{1}{2}\rho V^2\right)_m} = \left(1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{A}{C}\right)^2 \quad (3.3)$$

Aquí la corrección es aplicada a la presión dinámica ($1/2\rho V^2$) y los subíndices c y m denotan *corregido* y *medido*, respectivamente. Esta corrección puede ser aplicada a cualquier coeficiente aerodinámico, por ejemplo, cuando es aplicada para el coeficiente de arrastre (Ec.3.2) podemos escribir:

$$C_{D_c} = C_{D_m} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{A}{C}\right)^2} \right] \quad (3.4)$$

Capítulo 4. Diseño y construcción de la balanza de fuerzas

4.1 Túnel de viento de la Universidad Iberoamericana de Puebla (UIA).

El túnel de viento subsónico del Instituto de Innovación y Desarrollo Tecnológico (IDIT) es un túnel de viento de circuito abierto con una sección de prueba. La sección de prueba es de 1 m de largo y tiene un área circular de 0.45 m de diámetro [1]. La máxima velocidad alcanzada en la sección de prueba es de 7 m/s (25.2 km/h). El ventilador que genera el flujo de aire es de 5 HP y está conectado a un variador de frecuencia (Vacon® 20), el cual puede controlar la velocidad y la dirección del viento.

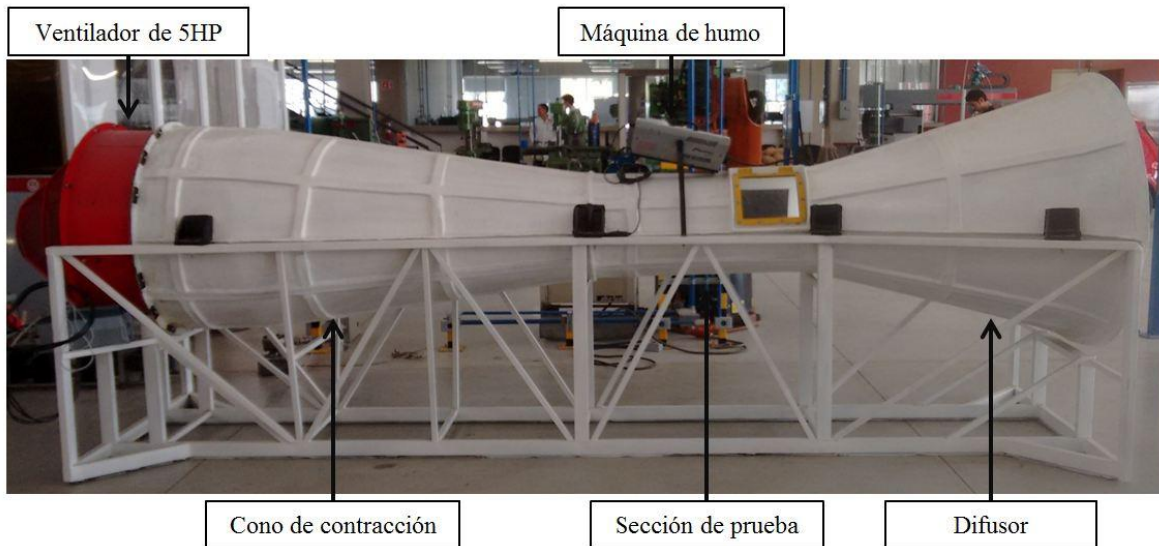


Fig. 4.1 Túnel de viento subsónico de la UIA y sus elementos principales.

4.2 Determinando el tamaño máximo del modelo

De acuerdo con [18], se puede obtener información precisa de un automóvil a escala con un área frontal de entre 7 y 9% del área transversal de la cámara de prueba (C).

$$C = \pi r^2 = \pi(0.225m)^2 = 0.159 m^2 \quad (4.1)$$

En consecuencia, el área frontal (A) de los automóviles a escala que se probarán dentro del túnel de viento deberá estar entre:

$$0.011 \text{ m}^2 \leq A \leq 0.014 \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

4.3 Cálculo de las fuerzas de arrastre y sustentación

Uno de los parámetros más importantes del diseño es el rango de los coeficientes de arrastre y sustentación que será capaz de medir. La lista de coeficientes aerodinámicos de la Tabla 3.1 fue tomada como referencia con el fin de poder realizar pruebas sobre una gran variedad de geometrías dentro del túnel. Por esta razón, los valores de los coeficientes considerados en el diseño son:

$$-4.8 \leq C_L \leq 0.44 \quad (4.3)$$

$$0.29 \leq C_D \leq 1.397 \quad (4.4)$$

El signo negativo que aparece en el coeficiente de sustentación significa que el auto es empujado hacia el suelo debido a la carga aerodinámica generada en su superficie.

4.3.1 Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación máxima para el túnel de viento puede ser calculada a través de la ecuación 3.1 :

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L A V^2 = \frac{1}{2} (0.94)(4.8)(0.014)(7.16)^2$$

$$L_{max} = 1.619 \text{ N} \quad (4.5)$$

Donde:

Densidad de aire (ρ) en la Cd. de Puebla	0.94 kg/m ³
Velocidad de viento máxima (V)	7.16 m/s
Coeficiente de sustentación máximo (C_L)	4.8
Área frontal máxima (A)	0.014 m ²

4.3.2 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre máxima para el túnel de viento puede ser calculada a través de la ecuación 3.2 :

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2 = \frac{1}{2} (0.94)(1.397)(0.014)(7.16)^2$$

$$D_{max} = 0.471 \text{ N} \quad (4.6)$$

Donde:

Densidad de aire (ρ) en la Cd. de Puebla	0.94 kg/m ³
Velocidad de viento máxima (V)	7.16 m/s
Coefficiente de arrastre máximo (C_D)	1.397
Área frontal máxima (A)	0.014 m ²

4.3.3 Fuerzas generadas por el momento de cabeceo

El momento de cabeceo depende de la fuerza de sustentación, la fuerza de arrastre y el momento de cabeceo sobre el modelo así como la geometría del diseño del instrumento. Por la gran cantidad de variables que afectan el cálculo del momento, se tomará como punto de partida las fuerzas de arrastre y sustentación máximas obtenidas anteriormente.

4.4 Parámetros para el diseño y construcción de la balanza de fuerzas

En la tabla 4.1 se resumen los parámetros del diseño que se discutieron en las secciones anteriores.

	Parámetros del diseño	Especificaciones
1	Máxima velocidad de viento en la sección de prueba (V_{max})	7.16 m/s (25.77 km/h)
2	Área transversal de la sección de prueba (C)	0.159 m ²
3	Longitud de la sección de prueba	1 m ²
4	Máxima área frontal (A)	0.014 m ²
5	Coefficiente de sustentación (C_L)	-4.8 a 0.44

6	Coefficiente de arrastre (C_D)	0.29 a 1.397
7	Fuerza de sustentación máxima (L_{max})	1.619 N
8	Fuerza de arrastre máxima (D_{max})	0.471 N
9	Densidad del aire (ρ), a nivel del mar.	1.225 kg/m ³
10	Densidad del aire (ρ), en la ciudad de Puebla.	0.94 kg/m ³

Tabla 4.1 Parámetros de diseño para la balanza del túnel de viento.

Además se tomarán en cuenta los siguientes puntos:

- El sensor que se utilice para medir la fuerza de sustentación deberá ser capaz de registrar fuerzas de extensión y de compresión, ya que el valor de los coeficientes de sustentación puede ser positivo o negativo.
- Los parámetros (7) y (8) de la tabla 4.1 sólo nos indican las fuerzas máximas generadas a raíz del incremento en la velocidad del viento. En la práctica, se deben de seleccionar sensores de rangos mayores debido a las cargas inherentes del diseño de la balanza (p. e. el peso del modelo).
- Como se mencionó en el capítulo 2, las partículas de aire tienden a adherirse a la superficie de confinamiento del fluido, lo que disminuye su velocidad. La máxima velocidad de viento se produce en el centro de la sección transversal de la cámara de pruebas. En consecuencia, el instrumento deberá contar con un mecanismo que permita ajustar la posición de los modelos dentro del túnel de viento.
- El dispositivo deberá separar las fuerzas de sustentación y arrastre de forma *directa*, permitiendo la fácil interpretación de los resultados experimentales. Además se deberán incluir elementos mecánicos (p. e. rodamientos) que minimicen los efectos de la fricción para asegurar una medición precisa de las fuerzas que actúan sobre el modelo.
- El material utilizado para la construcción del aparato deberá ser liviano, rígido y fácil de manufacturar de tal forma que sea duradero y fácil de transportar.
- No debe de ser necesario ningún tipo de anclaje o cimentación especial en su instalación.

4.5 Selección de los sensores para la cámara de prueba

Para determinar el desempeño aerodinámico del modelo a través de las ecuaciones 3.1 y 3.2, es necesario medir la velocidad del viento y las condiciones ambientales dentro de la cámara de pruebas al momento de llevar a cabo el experimento. Como se mencionó en el capítulo dos, la densidad de aire está íntimamente relacionada con la temperatura, humedad relativa y presión del fluido (aire).

4.5.1 Medición de la velocidad del viento

La velocidad del fluido puede ser medida de las siguientes formas:

- Midiendo la distancia, ds , recorrida por las partículas del fluido en un intervalo de tiempo conocido, dt (Velocimetría por imágenes de partículas, VIP) o midiendo el tiempo que le toma a las partículas viajar una distancia fija (Laser two focus anemometer, L2F). Debido a que el aire es transparente a la luz, tiene que ser inyectado con partículas sólidas o líquidas visibles las cuales, se asume, tienen la misma velocidad que la corriente de aire. Estos métodos requieren un equipo muy sofisticado.
- A través de la medición de otros parámetros (presión, efecto Doppler producido por las partículas del flujo, intercambio de calor entre el flujo y un cable de metal calentado por el efecto Joule, la velocidad de rotación de un molino, etc.) a partir de los cuales la velocidad puede ser calculada.

4.5.2 Anemómetro

El sensor seleccionado para medir la velocidad de viento dentro de la cámara de pruebas es el anemómetro ANM-BTA de la marca Vernier®. Este anemómetro, de tipo impulsor giratorio, tiene un eje de rotación paralelo a la dirección del viento. Un imán es colocado en el impulsor. El viento produce una rotación en el impulsor que a su vez hace girar al imán. La rotación del imán genera una señal eléctrica proporcional a la velocidad de viento.



Fig. 4.2 Anemómetro.

En la siguiente tabla se presentan las especificaciones del sensor [21].

Rango	Resolución máx.	Relación Voltaje – Velocidad ($W_s = mV + b$)	
$0.5 - 30 \frac{m}{s}$	$6 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$	$m = 10 \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{V}$	$b = -10 \frac{m}{s}$

Tabla 4.2 Rango y resolución del anemómetro.

4.5.4 Temperatura y humedad relativa

Para adquirir la temperatura y humedad relativa dentro de la sección de pruebas se optó por utilizar el sensor HIH6130 de la marca Honeywell®. El HIH6130 es un sensor de salida digital (I²C) que mide la humedad relativa y temperatura en un solo integrado. Esto permite que la medición de la humedad relativa tenga una compensación de temperatura.



Fig. 4.3 Sensor de humedad relativa y temperatura.

A continuación se presentan las especificaciones del sensor [22].

	Rango	Resolución	Precisión
Temperatura	5 – 50°C	0.025°C	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa	10 – 90 %RH	0.04 %RH	$\pm 4\text{ %RH}$

Tabla 4.3 Rango y resolución del sensor HIH6130.

4.5.5 Presión

Para adquirir la presión estática se seleccionó el sensor MS5803-14BA de la marca Measurement Specialties®. El MS5803-14BA es un sensor de presión de alta resolución con una interfaz I²C. Este sensor mide la presión absoluta del fluido que lo rodea, aire, agua o cualquier otro material que actúe como un fluido viscoso. Dependiendo de cómo se interprete la información, podemos determinar la altitud, profundidad del agua o cualquier otra tarea donde se requiera una lectura precisa de la presión.



Fig. 4.4 Sensor de presión.

La siguiente tabla resume los datos técnicos más importantes del sensor [23]:

	Rango	Resolución máx.	Precisión (0 – 40°C)
Presión	0 – 14 bar	0.2 mbar	$\pm 20\text{ mbar}$

Tabla 4.4 Rango y resolución del sensor MS5803-14BA.

4.6 Selección de los sensores de fuerza

4.6.1 Galgas extensiométricas

En una balanza de fuerzas es necesario que el modelo se mueva, incluso de forma infinitesimal, en la dirección de la fuerza aplicada. En las balanzas de fuerza eléctricas, los movimientos producidos por las fuerzas causan cambios en la capacitancia, inductancia o resistencia de un circuito eléctrico. Uno de los sensores más utilizados es la galga extensiométrica [24]. Las balanzas de fuerza basadas en galgas extensiométricas miden la deformación debida al desplazamiento del modelo producido por una fuerza aerodinámica.

Las ventajas de los sensores resistivos son su fiabilidad, construcción simple, resolución ajustable y tecnología libre de mantenimiento [25]. Además, la resistencia es una de las propiedades eléctricas más sencillas de medir de forma precisa sobre un amplio rango a un costo moderado. Las galgas extensiométricas son dispositivos que utilizan las propiedades piezoresistivas de un material elástico: metal, aleación, semiconductor o cermet. Este cambio en la resistencia se debe al cambio de la dimensión del elemento resistivo así como al cambio en la resistividad del material. El cambio en la resistencia puede ser medido conectando la galga extensiométrica en uno de los brazos de un puente Wheatstone.

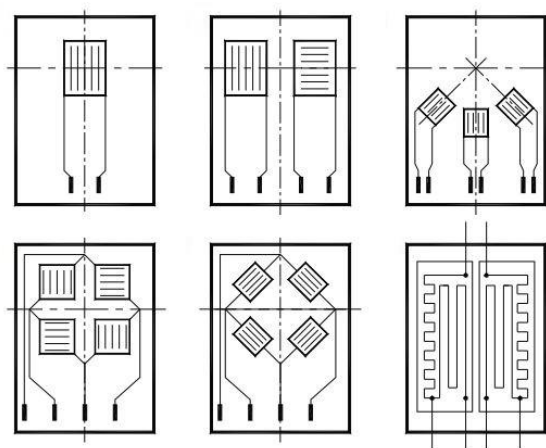


Fig. 4.5 Galgas extensiométricas clásicas.

4.6.2 Sensor de fuerza de rango dual

El sensor elegido para registrar las fuerzas de sustentación y arrastre, así como las fuerzas producidas por el momento de cabeceo, es el Dual-Range Force Sensor de la marca Vernier®.



Fig. 4.6 Sensor de fuerza de rango dual.

El sensor de fuerza de rango dual es un dispositivo de propósito general que mide fuerzas de extensión y compresión. Este sensor usa galgas extensiométricas para medir la fuerza a través de la flexión de una viga metálica. Las galgas extensiométricas adheridas a ambos lados de la viga cambian su resistencia con forme la viga se dobla. Las galgas son usadas en un puente de Wheatstone de tal forma que un pequeño cambio en la resistencia produzca un cambio de voltaje. Este cambio de voltaje es proporcional al cambio en la fuerza. Un interruptor permite seleccionar dos rangos de medición: $\pm 10\text{ N}$ o $\pm 50\text{ N}$.

Como en cualquier instrumento, existe un compromiso entre precisión y rango de medición. La resolución de las dos diferentes configuraciones es [26]:

Rango	Resolución	Relación Voltaje – Fuerza ($F = mV + b$)	
$\pm 10\text{ N}$	0.01 N	$m = -4.9\text{ N/V}$	$b = 12.25\text{ N}$
$\pm 50\text{ N}$	0.05 N	$m = -24.5\text{ N/V}$	$b = 61.25\text{ N}$

Tabla 4.5 Resolución y rango del Dual-Force Range Sensor.

Como se puede observar, este sensor satisface los criterios de diseño discutidos en la sección 4.4. Además, proporciona una relación lineal entre la salida de voltaje y la fuerza medida lo cual disminuye el tiempo de desarrollo del proyecto.

4.7 Modelo en CAD

Después de seleccionar los sensores de fuerza, se inició el diseño de la balanza de fuerzas en SolidWorks®. A continuación se presenta la vista isométrica del diseño completo (Fig. 4.4) y se describen brevemente sus elementos principales.

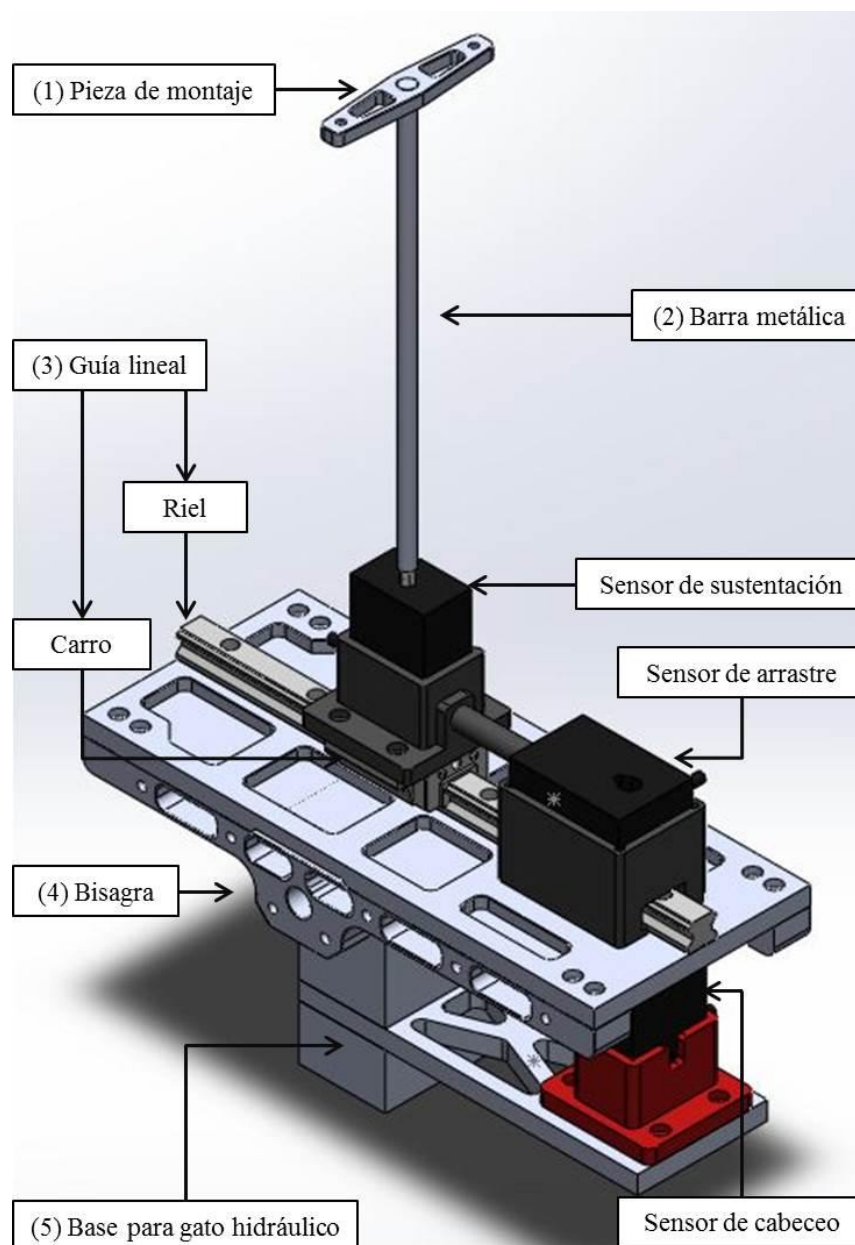


Fig. 4.7 Diseño 3D de la balanza de fuerzas.

(1) Pieza de montaje

En esta pieza se fijará el modelo de prueba.

(2) Barra metálica

Este elemento es esencial ya que es la unión entre el modelo y el instrumento. Esta pieza se atornilla al sensor de sustentación a fin de tener un mejor agarre y transmitir las fuerzas de arrastre y cabeceo a los demás sensores.

(3) Guía lineal

Una guía lineal consta de dos componentes básicos: un **riel** y un **carro de bolas**. Las guías lineales tienen como finalidad garantizar un movimiento lineal de baja fricción. La guía lineal seleccionada para nuestro instrumento tiene las siguientes características [27]:

Marca	Tipo de sistema	Modelo	Coefficiente de fricción (μ)
THK	Guía lineal	HSR	0.002 a 0.003

Tabla 4.6 Características de la guía lineal.

Como se puede observar en la Fig. 4.4, el **sensor de sustentación** está colocado sobre el carro y el **sensor de arrastre** está fijo en uno de los extremos del riel bloqueando el movimiento del carro. Cuando el carro se desplaza (a causa del arrastre) un cilindro de plástico presiona la punta de medición del sensor generando diferentes lecturas a medida que la velocidad del viento aumenta. Este mecanismo nos permite separar la fuerza de arrastre del modelo y medirla de forma precisa al disminuir las pérdidas ocasionadas por la fricción.

(4) Bisagra

Una bisagra es un elemento mecánico que conecta dos piezas y restringe su ángulo de rotación. Los componentes conectados rotan alrededor de un eje. La bisagra estará integrada por dos rodamientos de bolas con las siguientes características [28]:

Marca	Tipo de rodamiento	Serie	Coefficiente de fricción (μ)
NSK	Rodamiento de bolas de ranura profunda	6800	0.0013

Tabla 4.7 Características de los rodamientos.

Este mecanismo permite separar el momento de cabeceo del modelo. La fuerza generada por este momento será adquirida por el **sensor de cabeceo** el cual esta ubicado debajo del **riel**.

(5) Base para gato hidráulico

Uno de los desafíos del diseño fue encontrar un mecanismo que permitiera ajustar la posición del modelo dentro de la cámara de pruebas, soportara el peso del instrumento y además no comprometiera los métodos de separación de las fuerzas. Después de considerar varias opciones, se opto por montar la balanza de fuerzas (Fig. 4.4) sobre un gato hidráulico de tipo botella.



Fig. 4.8 Gato hidráulico.

La selección del tonelaje se hizo en relación a la diferencia entre la altura máxima y la altura mínima del aparato [29].

Gatos hidráulicos Truper®			
Capacidad (tons)	Altura máxima (cm)	Altura mínima (cm)	Δh (cm)
2	35	18	17
4	38.5	19.5	19
6	43.5	21.5	22
8	47	23	24
12	47.5	23	24.5
16	47.5	23	24.5
20	47.5	24	23.5
32	42.7	26	16.7
50	47.9	30	17.9

Tabla 4.8 Gatos hidráulicos Truper®.

Como se puede observar, el gato hidráulico de 8 toneladas tiene la mejor relación tonelaje – altura.

4.8 Construcción de la balanza de fuerzas

Una vez finalizado el diseño en CAD del instrumento, se dio inicio al proceso de manufactura en el Centro de Innovación en Mecatrónica (CIM) de la Facultad de Ciencias de la Electrónica.

Las partes principales del dispositivo fueron fabricadas a partir de bloques de aluminio 6061T6. Este material fue seleccionado ya que cumple con los parámetros de diseño presentados en la sección 4.4. En otras palabras: es ligero, resistente y fácil de maquinar. A continuación se presentan algunas imágenes del proceso de manufactura.

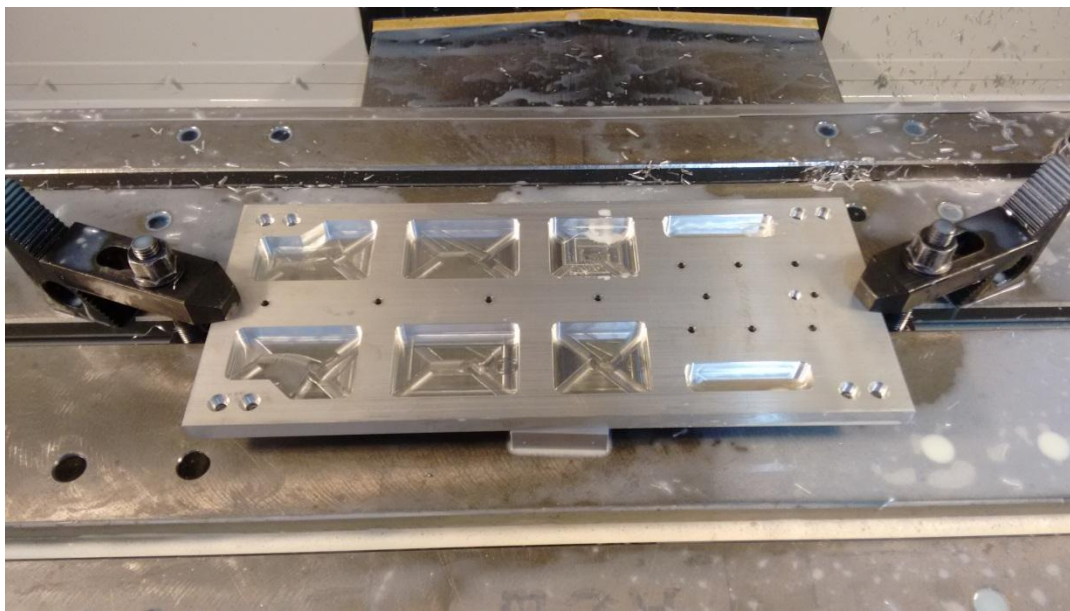


Fig. 4.9 Base para riel.

Las siguientes piezas que se fabricaron fueron los brazos de la bisagra, los cuales sostienen la base para riel (Fig. 4.4). A causa de su forma, fue necesario utilizar una técnica de montaje especial denominada *poka-yoke*. En esta técnica se hacen perforaciones a dos cortes iguales de aluminio de tal manera que se puedan atornillar. El corte de aluminio que tiene las roscas de los tornillos se sujeta a la prensa del centro de maquinado. De esta forma se reduce la vibración generada por el paso del cortador de aluminio alrededor del contorno de la otra pieza (*stock*).



Fig. 4.10 Montado del *stock* en el centro de maquinado.

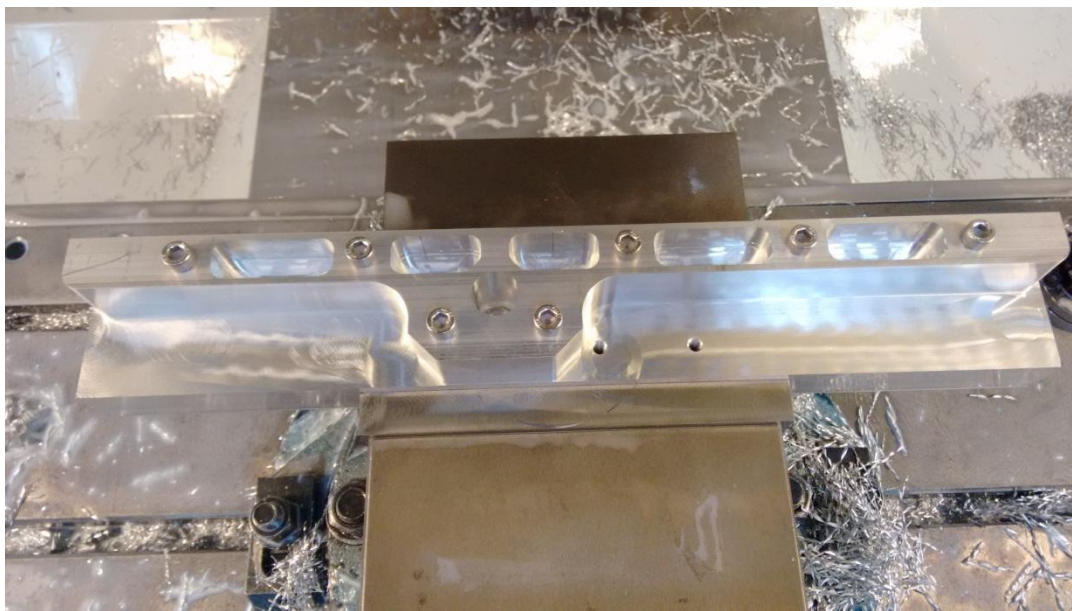


Fig. 4.11 Brazo izquierdo de la bisagra.



Fig. 4.12 Brazo derecho de la bisagra.

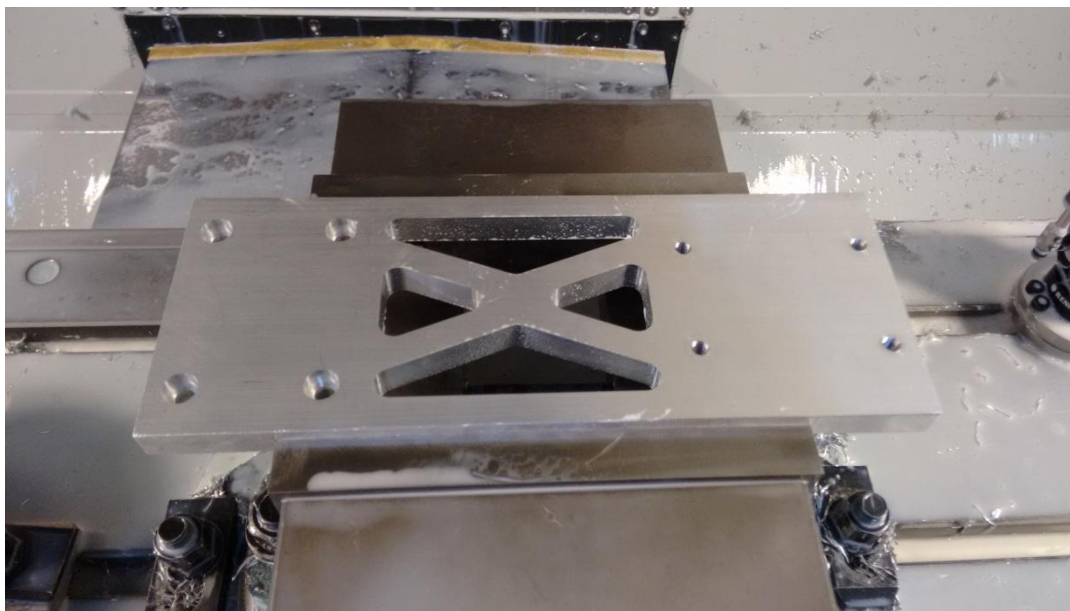


Fig. 4.13 Base para sensor de cabeceo.

Posteriormente se fabricó la base fija de la bisagra. Esta pieza fue la que requirió más pasos en su proceso de manufactura a causa de sus dimensiones. Para garantizar que el coeficiente de fricción de la bisagra fuera aquél de los rodamientos, se hizo un ajuste fino en el tamaño de la caja. Más precisamente, la diferencia entre el diámetro exterior del rodamiento y diámetro de la caja es de 0.01 milímetros.



Fig. 4.14 Base fija de la bisagra.

Al mismo tiempo, decidimos fabricar algunas piezas a través del proceso de impresión 3D para así disminuir el tiempo de desarrollo del proyecto. Las impresoras 3D permiten producir piezas cuyos detalles tomarían más tiempo en desarrollar por otros medios. Además, existe un mayor aprovechamiento del material y permiten hacer *pruebas de concepto* a un costo razonable.

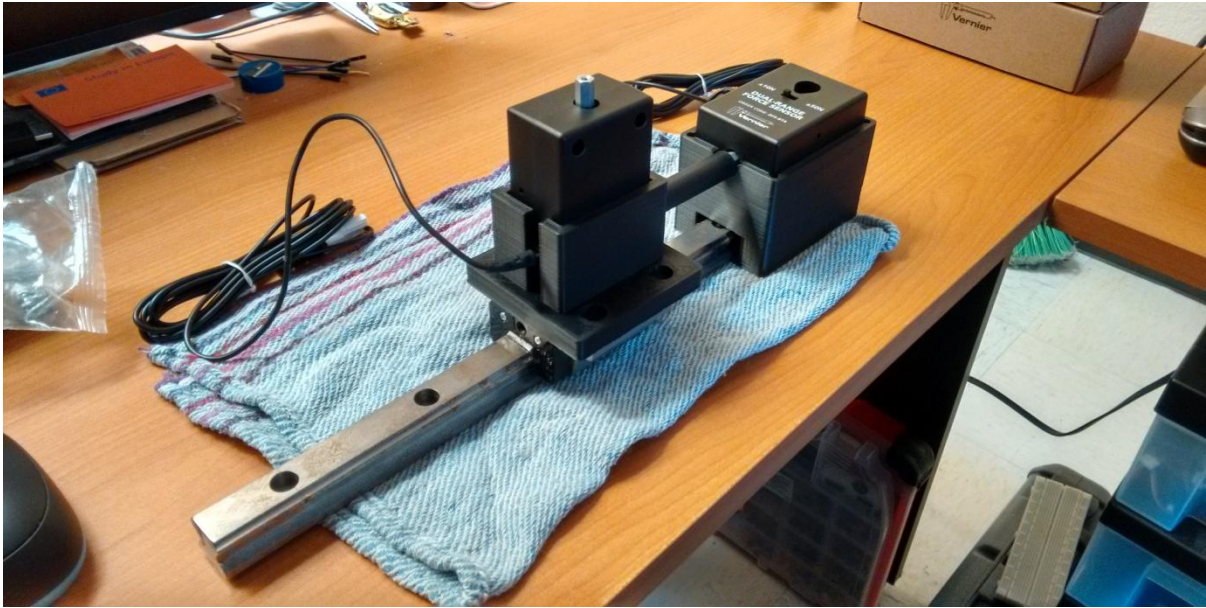


Fig. 4.15 Monturas para sensores fabricadas en impresora 3D.



Fig. 4.16 Montura para sensor de cabeceo.

Para finalizar este capítulo se presenta la balanza de fuerzas completamente ensamblada con un modelo a escala 1:14 del auto Jaguar XKR.



Fig. 4.17 Balanza de fuerzas terminada.

Capítulo 5. Instalación del sistema de instrumentación y evaluación del modelo Jaguar XKR

En este capítulo se presenta la instalación y puesta en marcha del sistema de instrumentación en el túnel de viento. Además, se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de un modelo a escala (1:14) del vehículo Jaguar XKR.

5.1 Instalación de la balanza de fuerzas

Como se mencionó en el capítulo anterior, la balanza de fuerzas no debe de requerir ningún anclaje especial al suelo de tal forma que el túnel de viento se pueda trasladar dentro del Instituto de Innovación y Desarrollo Tecnológico (IDIT). Por esta razón, la balanza de fuerzas fue montada sobre una placa de acero para construcción de 40 x 60 cm. De esta forma se obtiene una base sólida al suelo sin necesidad de cimentación.



Fig. 5.1 Balanza de fuerzas colocada debajo de la cámara de prueba.



Fig. 5.2 Modelo Jaguar XKR sobre la balanza de fuerzas.

Como se puede observar, se hizo una perforación en la cámara de pruebas para poder introducir la barra metálica y la pieza de montaje de la balanza de fuerzas.

5.2 Instalación de los sensores de temperatura, humedad y presión

Para colocar los sensores HIH6130 y MS5803-14BA dentro de la cámara de pruebas, se diseñó y fabricó una pieza de montaje en impresión 3D.

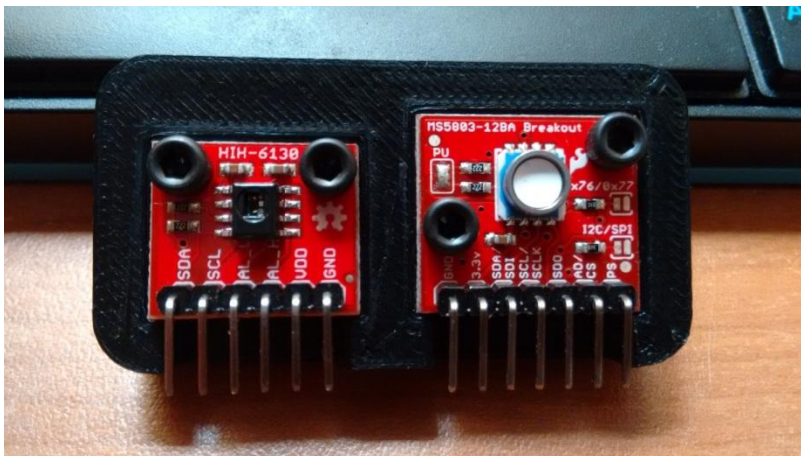


Fig. 5.3 Pieza de montado.

La pieza de montaje se pegó a la cámara de pruebas con cinta adhesiva de doble cara.

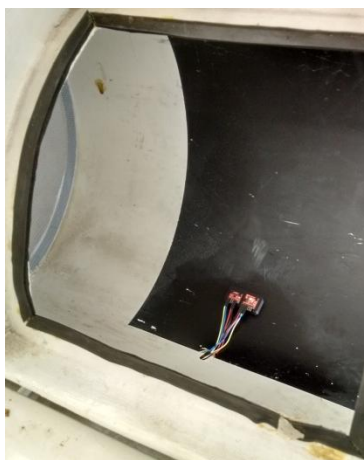


Fig. 5.4 Sensores montados en la cámara de pruebas.

5.3 Caracterización del túnel de viento

Para poder calcular los coeficientes de arrastre y sustentación de los modelos de prueba es necesario conocer la velocidad de viento en la cámara de pruebas de tal manera que se pueda relacionar con la fuerza medida en cada momento del experimento. La velocidad de viento es proporcional a la velocidad de giro del ventilador, la cual se controla a través de una entrada analógica de 0 a 10 V en el variador.

Debido a que el tamaño del anemómetro podría afectar la corriente de aire que pasa a través de los modelos, se decidió encontrar la relación entre el voltaje de entrada del variador y la velocidad de viento medida dentro de la cámara de pruebas. De esta forma no sería necesario colocar el anemómetro dentro de la cámara de prueba.

La salida analógica que se conecta a la entrada del variador fue generada con la tarjeta NI USB-6008. Un instrumento virtual fue diseñado para llevar a cabo la caracterización y guardar la información generada de la prueba. Los resultados se muestran a continuación:

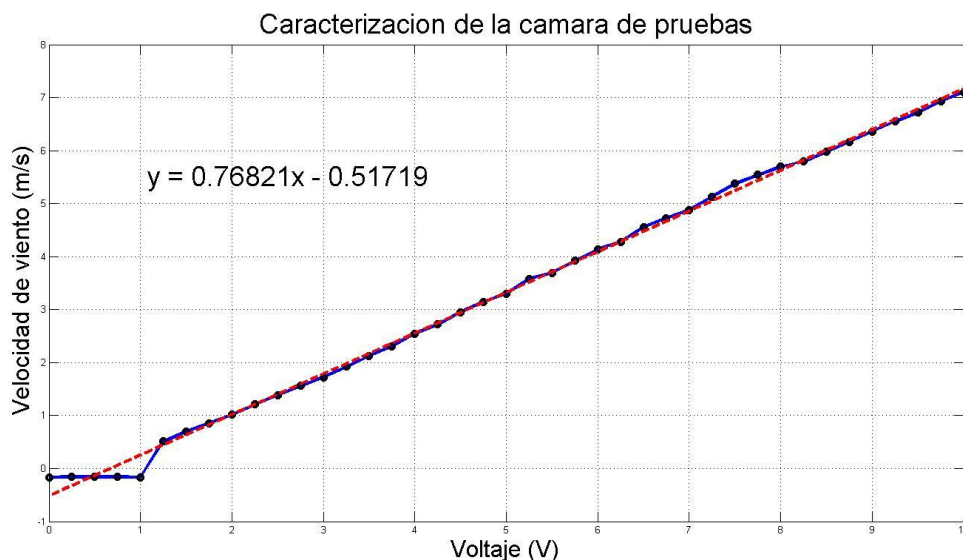


Fig. 5.5 Gráfica Voltaje – Velocidad de viento.

Por lo tanto, la relación entre el voltaje de referencia del variador y la velocidad de viento dentro de la cámara de pruebas es lineal. Si utilizamos el método de mínimos cuadrados para ajustar esta información a un polinomio de primer grado, obtenemos la siguiente ecuación:

$$W_s = (0.768)V - 0.517 \quad (5.1)$$

Donde:

- W_s es la velocidad del viento en la cámara de pruebas
- V es el voltaje aplicado a la entrada analógica del variador

Al tener una ecuación que relacione el voltaje de entrada del variador y la velocidad del viento de la cámara de pruebas, ya no es necesario colocar el anemómetro dentro del túnel.



Fig. 5.6 Anemómetro durante la caracterización.

5.5 Diseño del instrumento virtual en LabVIEW®

LabVIEW® fue elegido como sistema de desarrollo para el instrumento virtual ya que provee herramientas simples para diseñar Interfaces Gráficas de Usuario (IGU) profesionales. Además, este software es ampliamente utilizado en aplicaciones relacionadas con túneles de viento [30-32].

El instrumento virtual fue diseñado con un enfoque de máquinas de estado. El modelo de diseño de la máquina de estados es común y muy útil en LabVIEW. Una máquina de estado normalmente implementa un algoritmo moderadamente complejo de toma de decisiones, como una rutina de diagnóstico o la monitorización de un proceso.

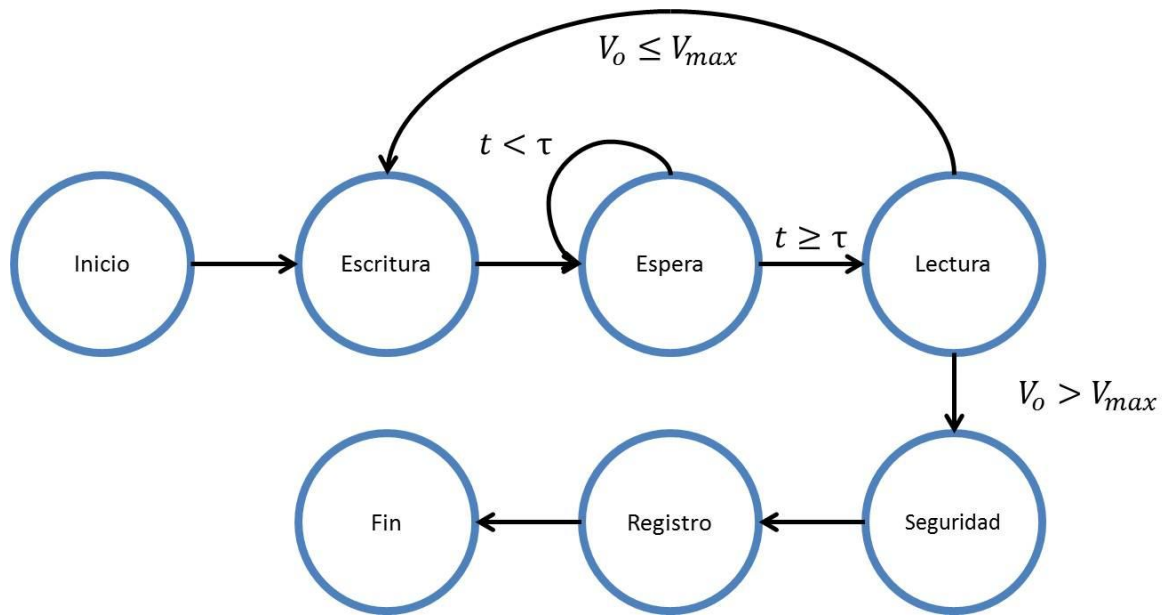


Fig. 5.7 Máquina de estados del instrumento virtual.

A continuación se ofrece una breve descripción de los estados de la máquina y sus condiciones de transición.

(1) Inicio

En este estado se inicia la comunicación con las tarjetas de adquisición de datos, Arduino y NI USB-6008. Asimismo, se configuran los parámetros de la prueba. Estos son:

- Incremento de voltaje en la entrada analógica del variador (ΔV).
- Tiempo de espera (τ).

(2) Escritura

En este estado se *escribe* el voltaje de salida analógico de la tarjeta NI USB-6008 (V_o) el cual está conectado con la entrada analógica del variador.

(3) Espera

Este estado se utiliza para asegurar que la velocidad del viento alcance una velocidad constante antes de llevar a cabo las lecturas de los sensores de fuerza. Para llevar a cabo la transición al estado **Lectura** es necesario que la diferencia entre el tiempo actual y el tiempo en el que se inició la prueba (t) sea mayor o igual que el tiempo de espera (τ). De otra forma la transición se realizará a sí mismo.

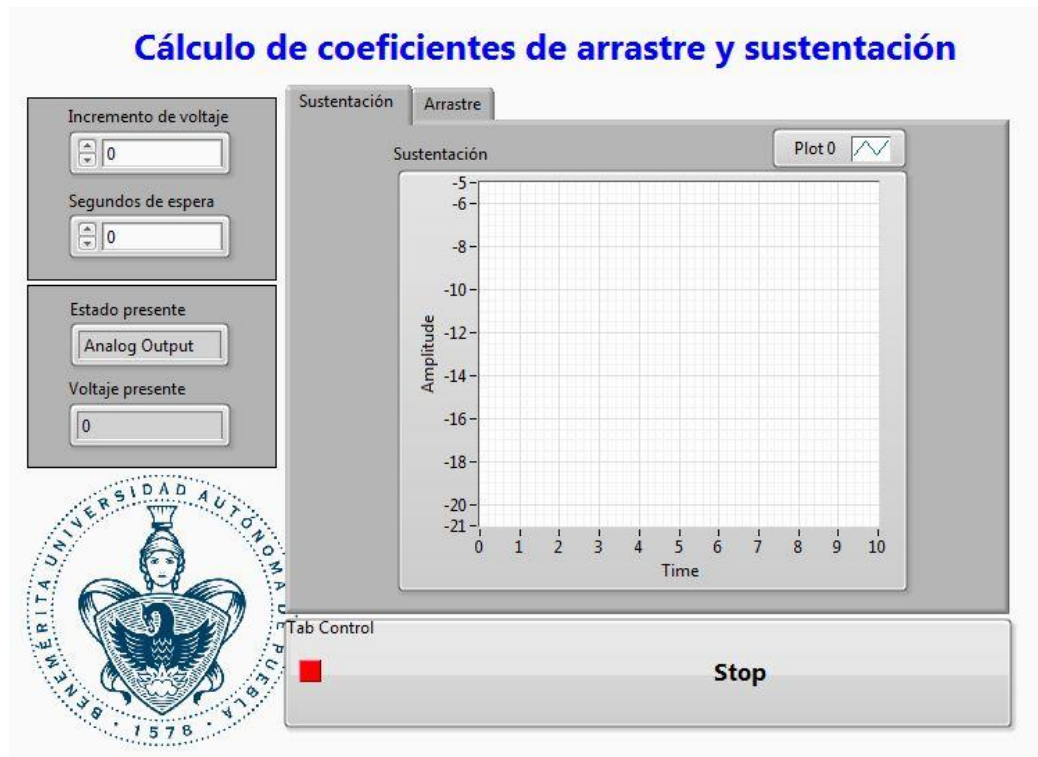


Fig. 5.8 Panel frontal del instrumento virtual.

(4) Lectura

Una vez se ha cumplido el periodo de asentamiento del fluido se realizan las mediciones de todos los sensores. En este estado se toman 250 muestras de cada sensor. El promedio de las muestras se almacena en un arreglo que posteriormente se guardará en un registro. En este bloque de programación se aumenta la variable de escritura del voltaje (V_o) según el incremento de voltaje configurado por el usuario (ΔV). Si el voltaje incrementado de la variable (V_o) es mayor que el voltaje máximo de la tarjeta ($V_{max} = 10\text{ V}$) entonces se hace una transición al estado **Seguridad**. De otra forma, se hace la transición al estado **Escritura**.

(5) Seguridad

En este estado se disminuye el voltaje de salida analógica de la tarjeta NI USB-6008 de forma gradual para así parar el ventilador sin provocar un fallo en el variador. Cabe mencionar que sin este estado el motor permanecería a máxima velocidad al finalizar la prueba.

(6) Registro

Este estado tiene un algoritmo que permite almacenar los datos de la prueba en un archivo de extensión (.xlsx) para su posterior análisis. Se eligió este tipo de fichero ya que es sencillo de exportar a una variedad de programas (p. e. MATLAB).

(7) Fin

Este estado se encarga de limpiar todos los datos almacenados de la memoria de la computadora. Además, finaliza la comunicación con las tarjetas de adquisición de datos.

5.6 Evaluación del modelo a escala Jaguar XKR

De acuerdo con el fabricante [33], las especificaciones del automóvil Jaguar XKR son las siguientes:

	Altura (m)	Ancho (m)	C_D
Jaguar XKR	1.312	1.892	0.33 – 0.35

Tabla 5.1 Especificaciones del Jaguar XKR.

En consecuencia, un modelo a escala 1:14 de este automóvil tendría 93 mm de altura y 135 mm de ancho. Con el fin de determinar el área de bloqueo (A) del modelo, se importó una imagen frontal del vehículo a SolidWorks® y se calculó el área de su *sombra* (Fig. 5.9). La imagen se ajustó, guardando una relación proporcional, a un área rectangular de 93 mm de altura y 135 mm de ancho. Después de ajustar la imagen, se aproximó el contorno del vehículo a través de líneas rectas para así obtener una geometría cerrada. Más tarde, se utilizó la opción “*Propiedades de Sección*” del menú “*Calcular*” para obtener el área frontal del vehículo. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

	Área Rectangular	Área Frontal (A)
Jaguar XKR (1:14)	0.0125 m^2	$9.578 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

Tabla 5.2 Características del modelo a escala.

Por lo tanto, el área frontal del modelo (A), calculada a través de SolidWorks®, es 23.4 % menor que un área rectangular de 93 mm por 135 mm.

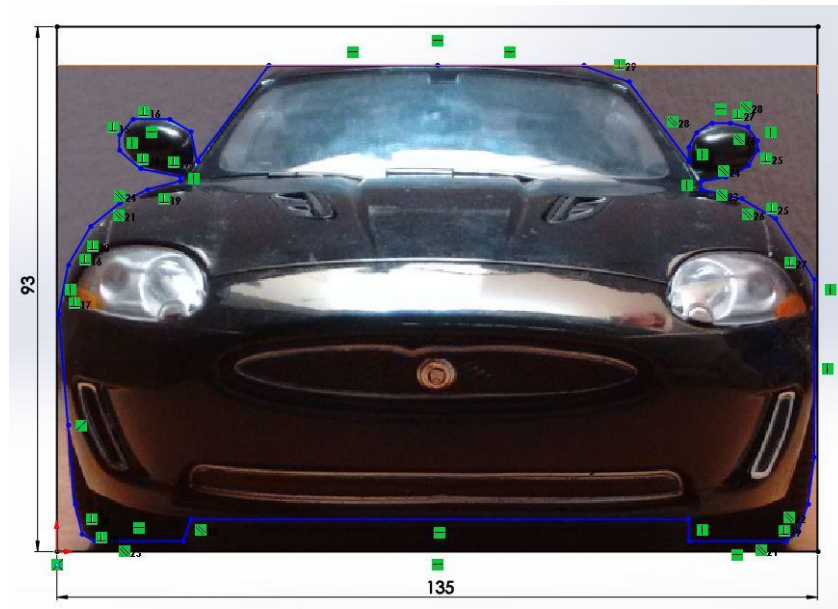


Fig. 5.9 Cálculo del área frontal del modelo en SolidWorks®.

El modelo se colocó sobre la pieza de montaje de la balanza de fuerzas y después se llevó acabo la prueba. Los parámetros del experimento fueron los siguientes:

- Un incremento en la salida analógica del variador (ΔV) de 250 mV.
- Un tiempo de espera (τ) de 1 minuto.

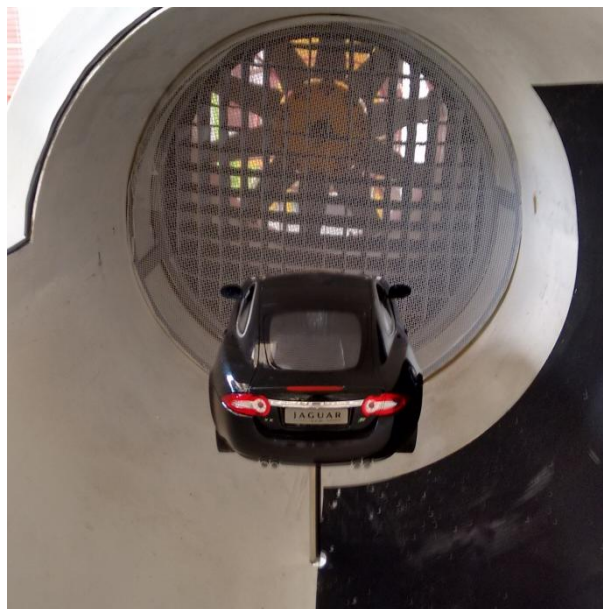


Fig. 5.10 Modelo montado sobre la balanza de fuerzas.



Fig. 5.11 Modelo a escala durante las pruebas.



Fig. 5.12 Túnel de viento durante las pruebas.

El tiempo total de la prueba fue de 50 minutos. Después de haber transcurrido este periodo de espera, el instrumento nos mostró los resultados de la prueba y los almacenó en un archivo (.xlsx). Este archivo fue exportado a MATLAB para hacer un análisis más rápido y sencillo de la información.

5.6.1 Resultados de las condiciones ambientales y cálculo de la densidad de aire.

A continuación se presentan las gráficas para la temperatura, humedad relativa y presión del aire al momento de hacer las pruebas en la cámara de prueba. La densidad de aire (ρ) se calculó a través de las ecuaciones (2.2) y (2.3):

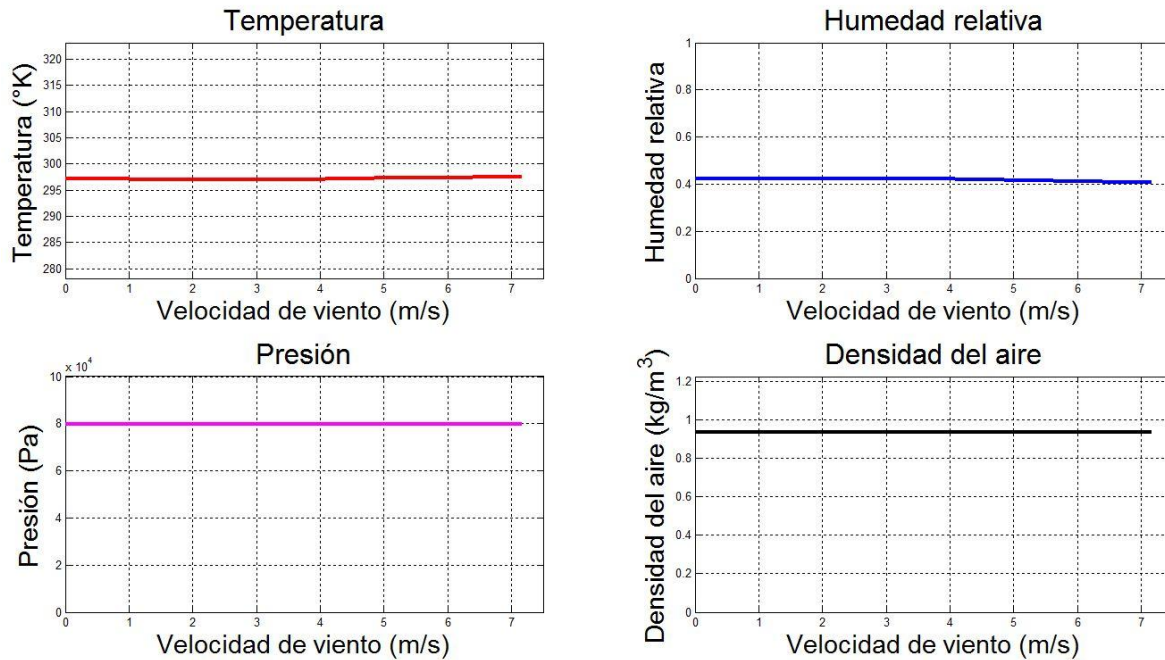


Fig. 5.13 Gráficas de las condiciones ambientales.

Cómo se puede observar, existen muy pocas variaciones en las características físicas de la corriente de aire durante la prueba. Éste es un resultado muy importante ya que nos indica que la densidad de aire se puede asumir constante durante la prueba. Después de obtener estos resultados, se llevo acabo el cálculo del promedio de cada una de las variables medidas:

- | | |
|--------------------|--------------------------|
| • Temperatura | 297.23°K (24.08°C) |
| • Humedad relativa | 0.418 (41.8%) |
| • Presión | 7.9822×10^4 Pa |
| • Densidad de aire | 0.9358 kg/m ³ |

5.6.2 Cálculo del coeficiente de arrastre (C_D) del modelo

Debido a que el fabricante sólo otorga información sobre el coeficiente de arrastre (C_D) del vehículo, se decidió realizar la comparación de los resultados de la prueba exclusivamente para este coeficiente. A continuación se presenta la metodología que se siguió para el análisis de los resultados obtenidos del instrumento.

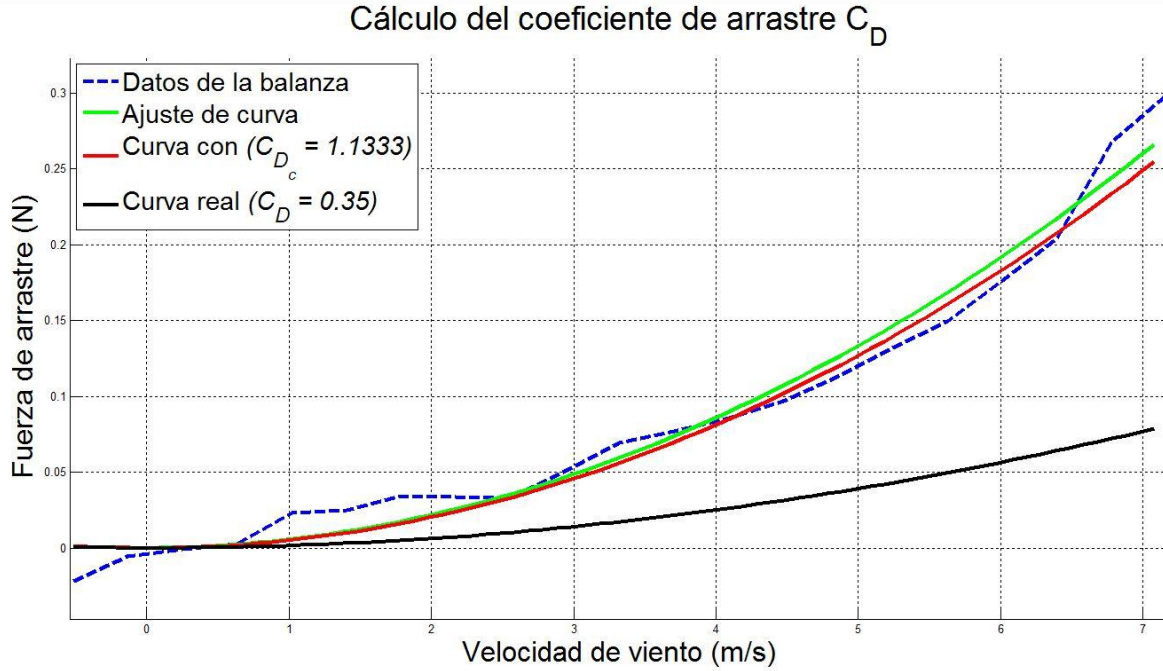


Fig. 5.14 Fuerza de arrastre (D) contra velocidad de viento (W_s).

En la Fig. 5.12 se muestran cuatro gráficas:

1. Datos de la balanza (*línea azul discontinua*)

Esta es la información obtenida del instrumento. Como se explicó en el capítulo 3, la interacción de las paredes del túnel con las líneas de corriente del fluido genera mediciones sobrestimadas de la fuerza de arrastre.

2. Ajuste de curva (*línea verde*)

Esta curva es el resultado de utilizar el método de mínimos cuadrados para ajustar los datos obtenidos de la balanza (*línea azul discontinua*) a un polinomio de segundo grado. De tal forma que la relación estadística entre la velocidad de viento (W_s) en la cámara de prueba y la fuerza de arrastre (D) que actúa sobre el modelo es:

$$D = (0.0052)W_s^2 + (0.0005)W_s + 0.6725 \quad (5.2)$$

3. Curva con C_D corregido (línea roja)

Si igualamos a cero los términos de menor orden de la ecuación (5.2), podemos hacer una identificación paramétrica del coeficiente de arrastre medido a través de la ecuación (3.1.) :

$$C_{Dm} = \frac{2a}{\rho A} \quad (5.3)$$

Donde:

- C_{Dm} , es el coeficiente de arrastre medido
- a , es el coeficiente del término al cuadrado de la ecuación (5.2)
- ρ , es la densidad de aire
- A , es el área frontal del modelo a escala

Por lo tanto,

$$C_{Dm} = \frac{2(0.0052 \text{ kg/m})}{(0.9358 \text{ kg/m}^3)(9.578 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} \approx 1.1677 \quad (5.4)$$

Este coeficiente está sobrestimado, de manera que se utilizará la ecuación (3.4) para *corregir* el coeficiente:

$$C_{Dc} = C_{Dm} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{A}{C}\right)^2} \right] = (1.1677) \cdot \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{9.578 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{0.159 \text{ m}^2}\right)^2} \right] = 1.1333 \quad (5.5)$$

Aquí C es el área de la sección transversal de la cámara de prueba.

La línea roja representa la gráfica (D contra W_s) de la ecuación (3.1) con el coeficiente de arrastre corregido.

4. Curva real (línea negra)

Esta curva representa la gráfica (D contra W_s) de la ecuación (3.1) con el coeficiente de arrastre proporcionado por el fabricante ($C_D = 0.35$).

Se llevaron acabo seis pruebas experimentales sobre el modelo Jaguar XKR con el fin de evaluar la precisión y exactitud del sistema de instrumentación. Los resultados fueron analizados usando la metodología antes mencionada. A continuación se muestran los coeficientes de arrastre calculados en cada prueba:

	Experimento					
	1	2	3	4	5	6
C_{D_m}	1.0487	1.0655	1.1677	1.1151	1.1601	1.0383
C_{D_c}	1.0178	1.0341	1.1333	1.0823	1.1260	1.0077
C_{D_F}	0.3339	0.3392	0.3718	0.3551	0.3694	0.3306

Tabla 5.3 Coeficientes de arrastre medidos y corregidos obtenidos de las pruebas.

Como se puede observar, los coeficientes de arrastre están sobrestimados. Sin embargo, el sistema de instrumentación tiene una buena precisión ya que los resultados están muy cerca entre sí. Para disminuir la diferencia entre el valor real y el valor medido, se identificó un factor de corrección (α):

$$\alpha = \frac{0.35}{\overline{C_{D_c}}} = 0.3281 \quad (5.6)$$

Donde:

- $\overline{C_{D_c}}$, es el promedio de los coeficientes de arrastre corregidos.

La comparación entre de los resultados experimentales y la gráfica real se muestra en la Fig. 5.15. Estas gráficas muestran que el sistema de instrumentación tiene una buena repetitividad y exactitud en las mediciones, una vez aplicado el factor de corrección (α). La exactitud del instrumento es de $\pm 6\%$ para el coeficiente de arrastre C_D del modelo Jaguar XKR.

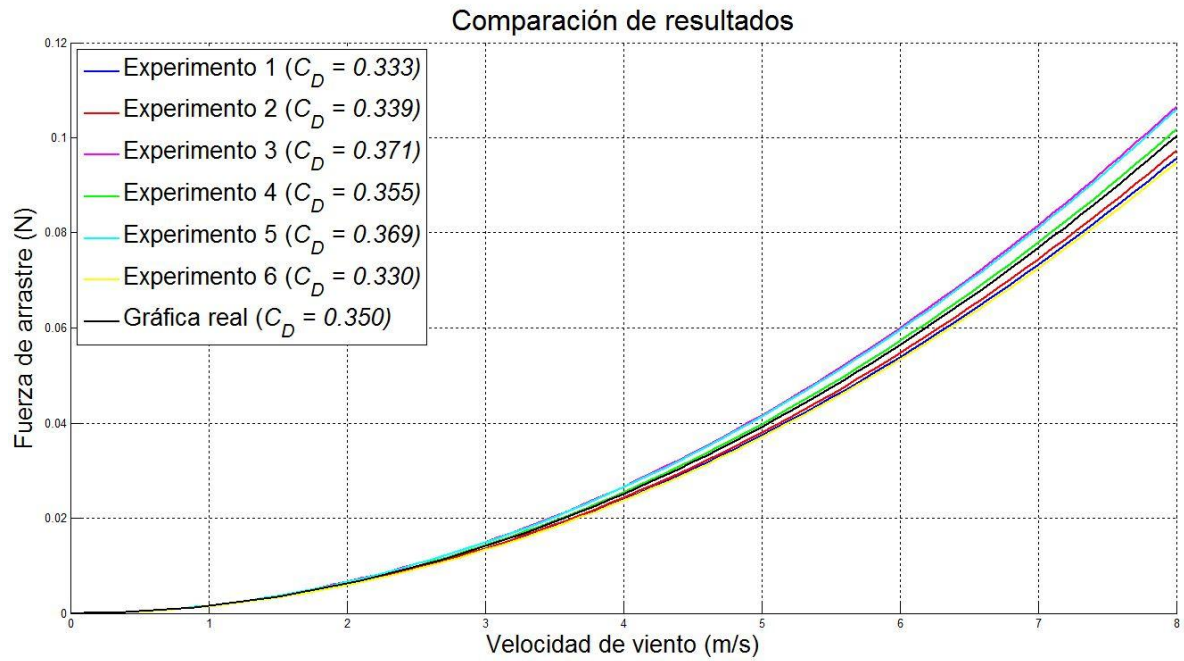


Fig. 5.15 Comparación de los resultados experimentales.

Conclusiones

En este trabajo se recopiló una gran cantidad de información concerniente a la instrumentación en túneles de viento subsónicos y las principales aplicaciones de estas pruebas en la industria automotriz e ingeniería de viento. Este esfuerzo tendrá grandes implicaciones en el desarrollo tecnológico del país ya que hará de conocimiento público un resumen de gran número de referencias y fuentes bibliográficas que en muchos casos son costosas y difíciles de conseguir. Más aún, la información contenida en este trabajo de investigación es suficiente para reproducir este instrumento, o uno similar, en cualquier universidad o institución del país.

En nuestro conocimiento, la balanza de fuerzas presentada en este trabajo es el primer dispositivo en su tipo en ser diseñado y construido en territorio nacional convirtiéndose en un referente importante en el área de aerodinámica y aeronáutica. Como se mostró, este instrumento separa exitosamente las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre los modelos al reducir el coeficiente de fricción (μ) hasta un valor de 0.001. Además, las mediciones de las fuerzas aerodinámicas tienen un rango y resolución competitivos en relación con los sistemas de instrumentación presentados en el estado del arte (Tabla 1.1).

Los sensores que se integraron a la cámara de pruebas nos permitieron conocer de forma precisa las características del aire durante las pruebas. En este punto podemos concluir que es correcto asumir que la densidad de aire es constante a lo largo de la prueba. Sin embargo, es indispensable calcularla *in situ*, así como medir la temperatura, humedad relativa y presión del fluido, ya que es importante adjuntar estos datos en los reportes al compartirlos con otros miembros de la comunidad científica y tecnológica.

La conjunción entre el instrumento virtual (LabVIEW®) y las tarjetas de adquisición de datos probó ser muy efectiva. No solo permite realizar una prueba precisa, automatizada y segura sino también llevar acabo un análisis *offline* de los resultados al almacenarlos en un fichero (.xlsx).

Personalmente, este trabajo de investigación ha representado un gran reto intelectual en cada una de sus etapas de desarrollo, desde la investigación hasta el análisis de resultados. Esto me ha dado la oportunidad de aplicar todos los conocimientos y habilidades que he adquirido a lo largo de la carrera. Finalmente, este trabajo tiene como objetivo último contribuir al desarrollo de conocimiento tecnológico del país y está destinado a aquellos que desean incursionar en la aerodinámica automotriz y civil.

Trabajo a Futuro

Como se precisa en la sección de análisis de resultados, es necesario encontrar factores de corrección que permitan calcular los coeficientes de arrastre y sustentación de los modelos con mayor exactitud. Esto se puede lograr a través de la evaluación de perfiles aerodinámicos cuyos coeficientes de arrastre y sustentación estén bien definidos. Al comparar los coeficientes aerodinámicos medidos con los reales, se pueden establecer relaciones que mejoren la exactitud general del instrumento.

El trabajo a futuro contempla el diseño y manufactura de modelos aerodinámicos *estándar* (p. e. Esfera) así como su evaluación dentro del túnel de viento con el fin de crear un manual de prácticas para los estudiantes de Ingeniería Automotriz e Ingeniería Civil de la Universidad Iberoamericana de Puebla (UIA).

Bibliografía

- [1] Cruz-Monterrosas, J. M. (2013). *Diseño, simulación y construcción de un túnel de viento subsónico*, Tesis de licenciatura de Ingeniería en Mecatrónica, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [2] Benson, T., *Build your own wind tunnel*. Recuperado el 9 de Junio de 2015 de: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/build.html>
- [3] Benson, T., *Student wind tunnel gallery: Kirkwood HS wind tunnel*. Recuperado el 9 de Junio del 2015 de: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/gallery/kirkwood/tun1.html>
- [4] Spahn, J. & Steelman R., *How to build and use a subsonic wind tunnel*. Recuperado el 9 de Junio de 2015 de: <http://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/wind-tunnel-toc.shtml#introduction>
- [5] Pieterse, F. F. (2002). *Design and development of a three component strain gauge wind tunnel balance*, Tesis de maestría, Rand Afrikaans University.
- [6] Moreno-Regan, U. (2008). *Rehabilitación del túnel de viento subsónico C2-00 y determinación del coeficiente de resistencia de diferentes modelos de prueba en el túnel*, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional.
- [7] Dirección General de Comunicación Social UNAM. *En marcha, el túnel de viento de la UNAM*. Recuperado el 10 de Junio de 2015 de: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_070.html
- [8] BBVA Bancomer Research (2012). *Industria automotriz: clave del crecimiento económico en México*, México D.F. Recuperado el 10 de Junio de 2015 de: https://www.bbvaresearch.com/KETD/fbin/mult/120125_PresentacionesMexico_81_tcm346-285045.pdf?ts=1472012
- [9] Mirón, M. (2013). *Prepara BUAP seis nuevas carreras*, El sol de Puebla. Recuperado el 11 de Junio de 2015 de: <http://www.oem.com.mx/elsoldepuebla/notas/n2914537.htm>
- [10] (2013). *Dona VW un auto al Laboratorio de Sistemas Automotrices de la BUAP*, Puebla Noticias. Recuperado el 11 de Junio de 2015 de: <http://www.pueblanoticias.com.mx/noticia/dona-vw-un-auto-al-laboratorio-de-sistemas-automotrices-de-la-buap-37341/>
- [11] Barlow, J. B, Rae, W. H. & Pope, A. (1999). *Low-Speed Wind Tunnel Testing*, (3ª ed.) EU: John Wiley & Sons.
- [12] Katz, J. (1996). *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*, (2ª ed.) EU: Bentley Publishers.

- [13] Simio, E. (1982). Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering, *Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [14] Roberts, S. (2013). *Wind Wizard: Alan G. Davenport and the Art of Wind Engineering*, EU: Princeton University Press.
- [15] Jones, F. E. (1995). *Techniques and Topics in Flow Measurements*, EU: CRC Press.
- [16] Schlichting, H. S. (2000) *Boundary-Layer Theory*, Alemania: Springer.
- [17] Chattot, J. J. & Hafez, M. M. (2015). *Theoretical and Applied Aerodynamics and Related Numerical Methods*, Alemania: Springer.
- [18] SAE. (1987). "Vehicle Aerodynamics Terminology Recommended Practice", *SAE J1594*.
- [19] Anderson, J.D. (2011). *Fundamentals of Aerodynamics*, (5^a ed.) EU: McGraw-Hill.
- [20] Passmore, M. & Le Good, G. (1994). "A Detailed Drag Study using the Coastdown Method", *SAE Technical Paper 940420*.
- [21] Vernier®. (2012). *Anemometer – User Manual*. Recuperado el 7 de Agosto de 2015 de: <http://www.vernier.com/files/manuals/anm-bta.pdf>
- [22] Honeywell®. *HH6130 – Datasheet*. Recuperado el 7 de Agosto de 2015 de: <http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Prototyping/1443945.pdf>
- [23] Measurement Specialties®. MS5803-14BA – Datasheet. Recuperado el 7 de Agosto de 2015 de: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Weather/ms5803_14ba.pdf
- [24] Russo, G. P. (2011). *Aerodynamic Measurements: From physical principles to turnkey instrumentation*, (1^a ed.) RU: Woodhead Publishing.
- [25] Stefanescu, D. M. (2011). *Handbook of Force Transducers: Principles and Components*, Alemania: Springer.
- [26] Vernier®. (2012). *Dual-Range Force Sensor – User Manual*. Recuperado el 7 de Agosto de 2015 de: <http://www.vernier.com/files/manuals/dfs-bta.pdf>
- [27] THK®. *THK General Catalog – General Description*. Recuperado el 8 de Agosto de 2015 de: http://www.thk.com/sites/default/files/documents/us_pdf/products/generalA/en_A_1_general.pdf
- [28] NSK®. *The ABC of Bearings – Technical Data*. Recuperado el 8 de Agosto de 2015 de: http://www.jp.nsk.com/app01/en/ctrq/index.cgi?gr=dn&pno=NSK_CAT_E1102m_A126-141

- [29] Truper®. *Manual – Gato hidráulico tipo botella*. Recuperado el 8 de Agosto de 2015 de: <https://www.truper.com/pdf/manuales/gat.pdf>
- [30] Singh C. & Poddar K. (2008). “Implementation of a LabVIEW-based automated wind tunnel instrumentation system”, *India Conference INDICON 2008*, vol.1, pp.103-108.
- [31] Singh C. & Poddar K. (2008). “Implementation of a VI-based multi-axis motion control system for automated test and measurement applications” *TENCON 2008 IEEE Region 10 Conference*, vol., no., pp.1,6, 19-21.
- [32] Singh C. & Poddar K. (2006) “PXI-based High-Performance Versatile Instrumentation and Motion Control System for Wind Tunnel Applications”, *IEEE International Conference on Industrial Technology - ICIT 2006*, pp. 704-709.
- [33] Jaguar Land Rover®. *Jaguar XKR-S 2012 Model Year Press Kit*. Recuperado el 8 de Agosto de 2015 de: http://newsroom.jaguarlandrover.com/en-in/jaguar/press-kits/2011/03/xkr-s_12my_press_kit_010311/

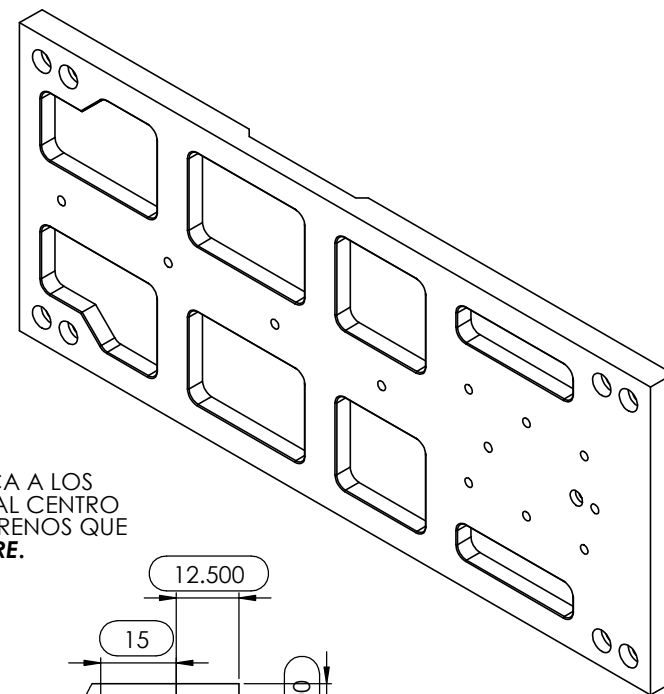
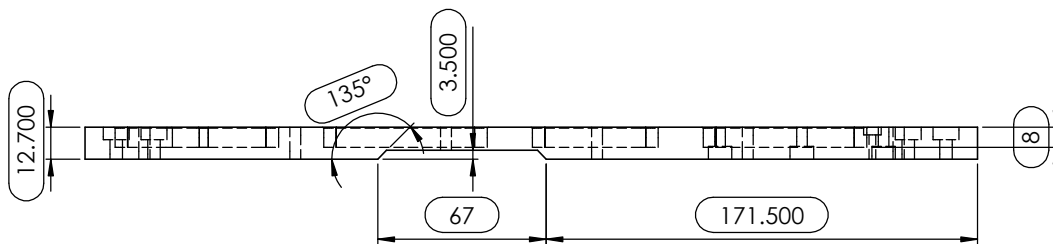
Apéndices

A. Planos de construcción de la balanza de fuerzas

En esta sección se presentan los dibujos técnicos de los componentes que se diseñaron para construir la balanza de fuerzas.

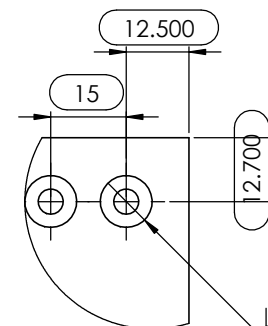
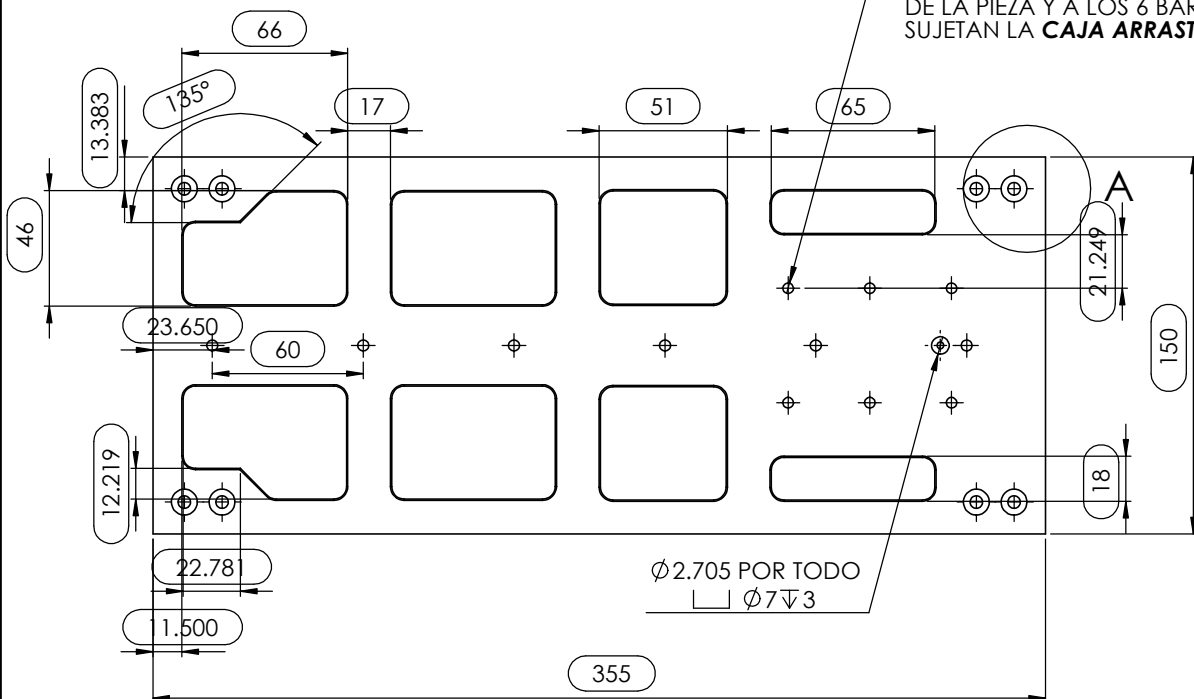
Notas importantes:

- Las dimensiones (*cotas*) de las piezas están en milímetros.
- La tolerancia general es de ± 0.3 mm, a menos que se indique lo contrario.
- El material utilizado en la fabricación de las piezas es aluminio 6061T6, a menos que se indique lo contrario.



Ø 4.200

NOTA B:
ESTA OPERACIÓN SE APLICA A LOS
6 BARRENOS A LINEADOS AL CENTRO
DE LA PIEZA Y A LOS 6 BARRENOS QUE
SUJETAN LA **CAJA ARRASTRE**.



Ø 5 POR TODO
└─┘ Ø 10.300 ∇ 5

NOTA A:
ESTA OPERACIÓN SE APLICA A LOS
8 BARRENOS UBICADOS EN LAS
ESQUINAS DE LA PIEZA

DETALLE A
ESCALA 1 : 1



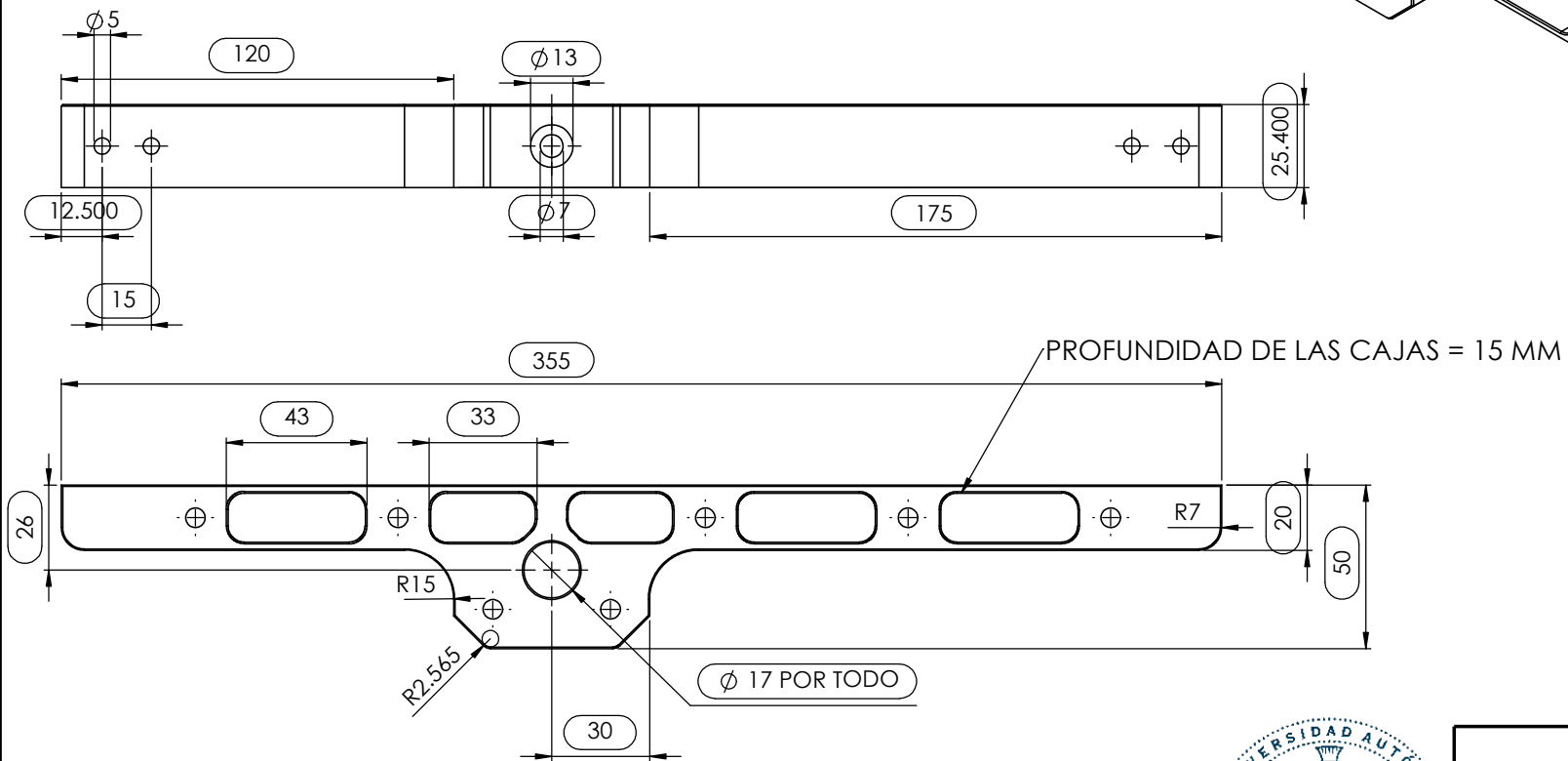
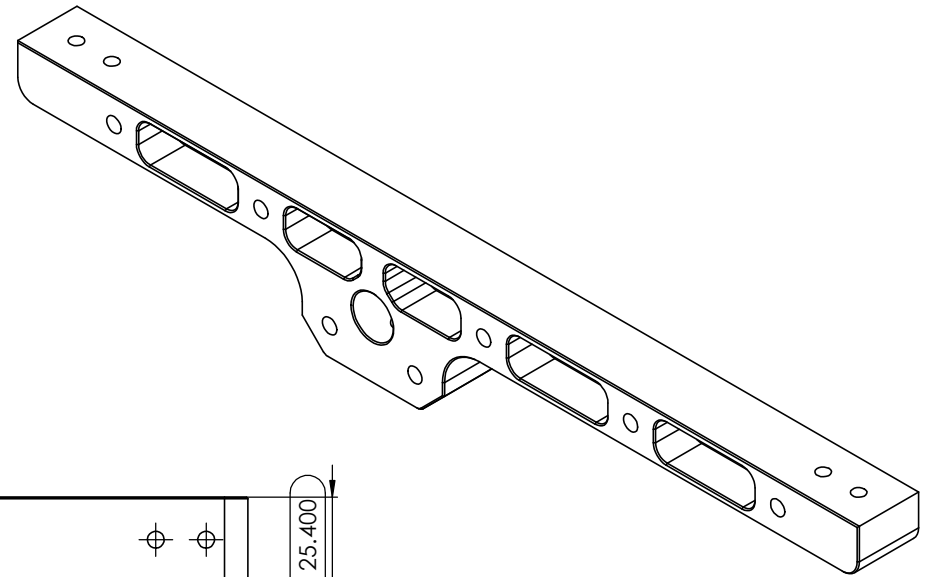
TÍTULO:
FACULTAD DE CIENCIAS DE
LA ELECTRÓNICA

N.º DE DIBUJO
BASE RIEL

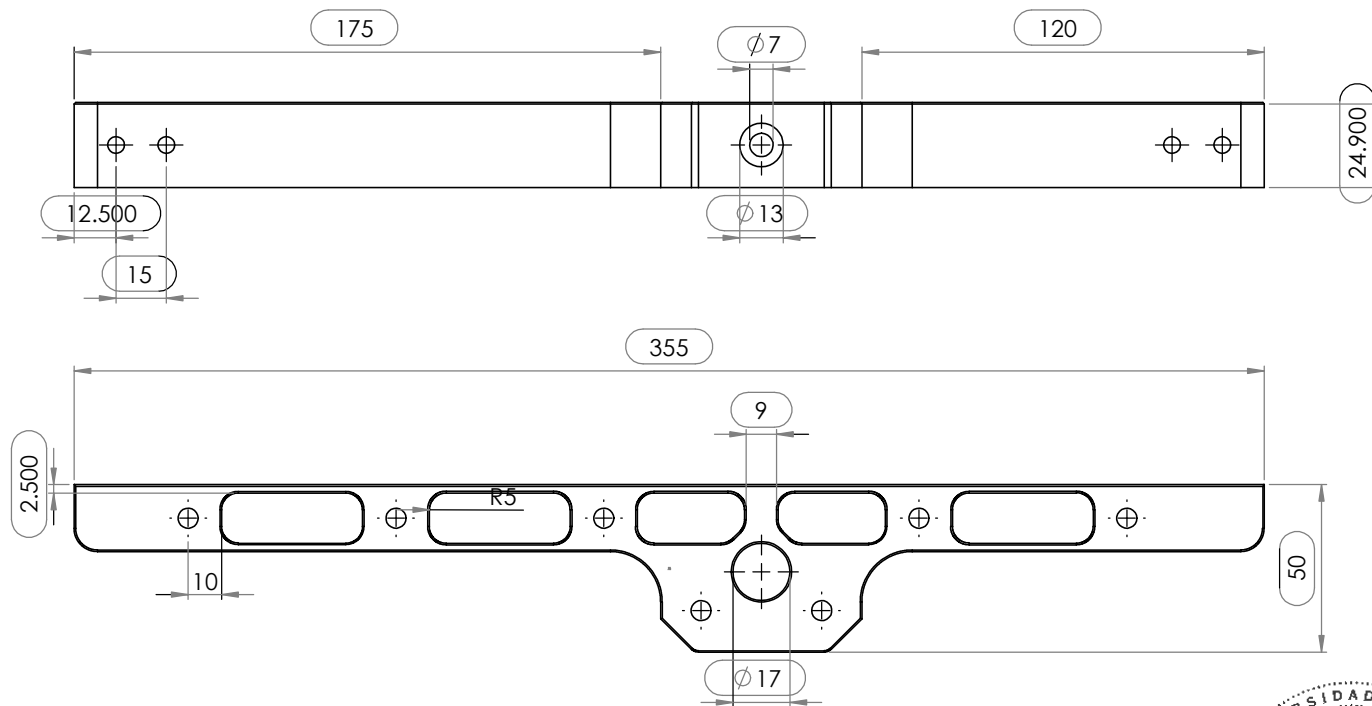
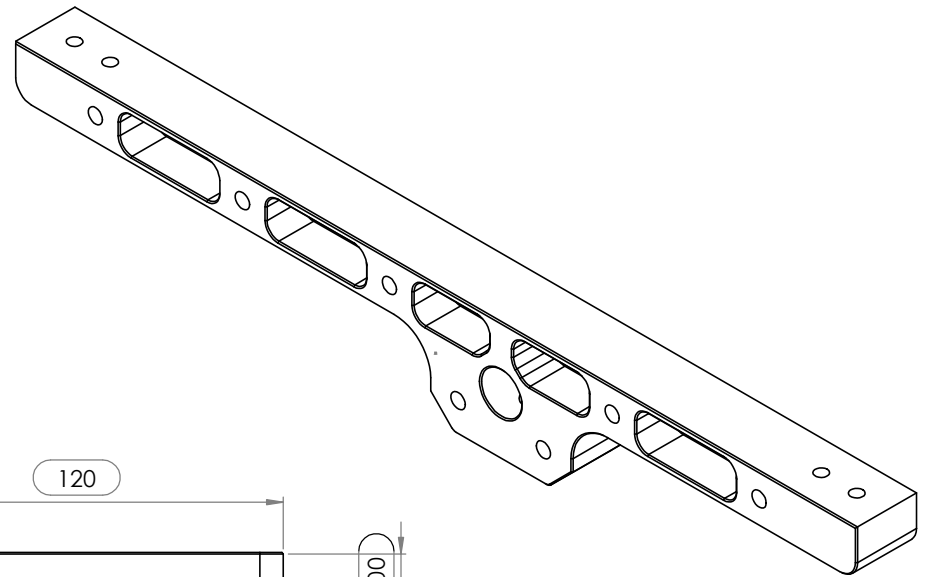
A3

ESCALA: 1:5

HOJA 1 DE 1



TÍTULO:	
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA	
Nº DE DIBUJO:	A3
BISAGRA BRAZO IZQUIERDO	
ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1



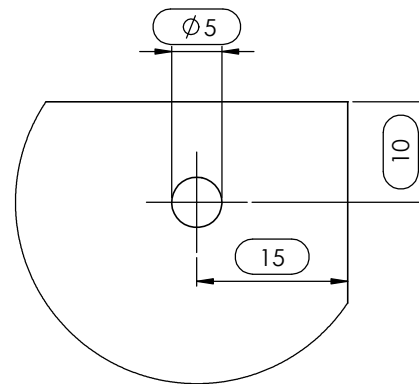
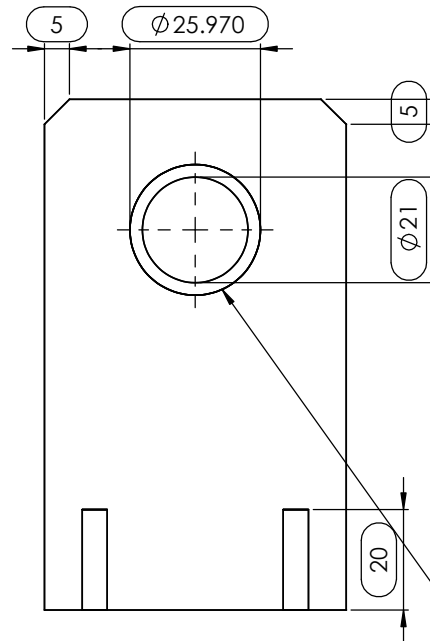
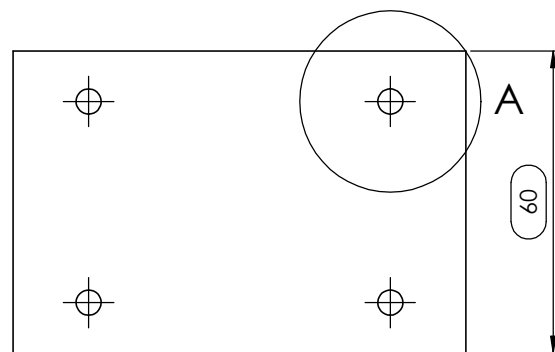
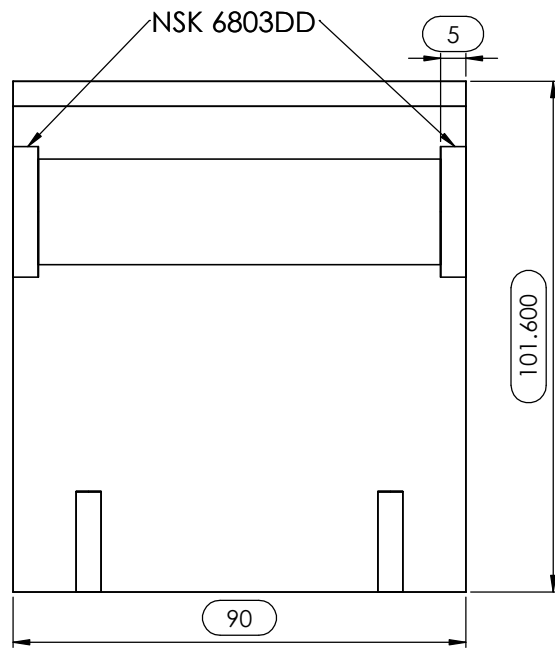
TÍTULO:
FACULTAD DE CIENCIAS DE
LA ELECTRÓNICA

N.º DE DIBUJO:
BISAGRA BRAZO DERECHO

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1

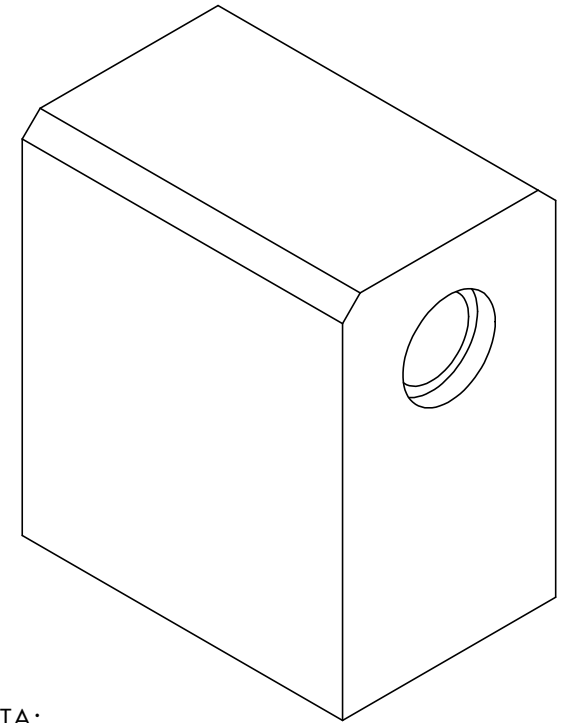
A3



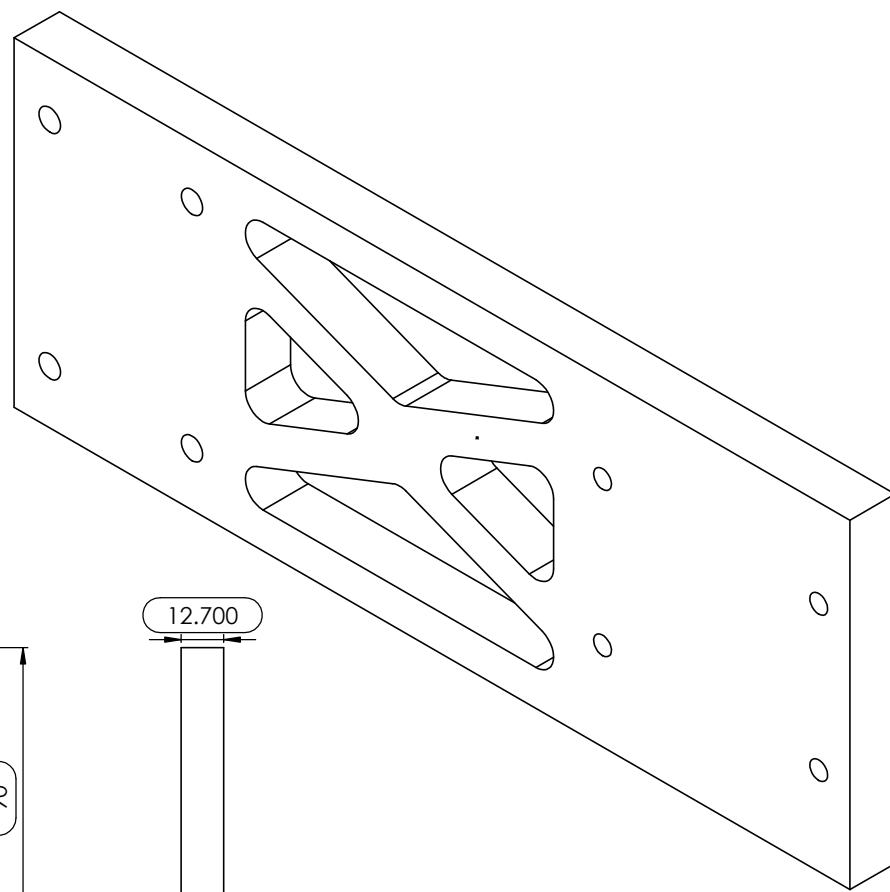
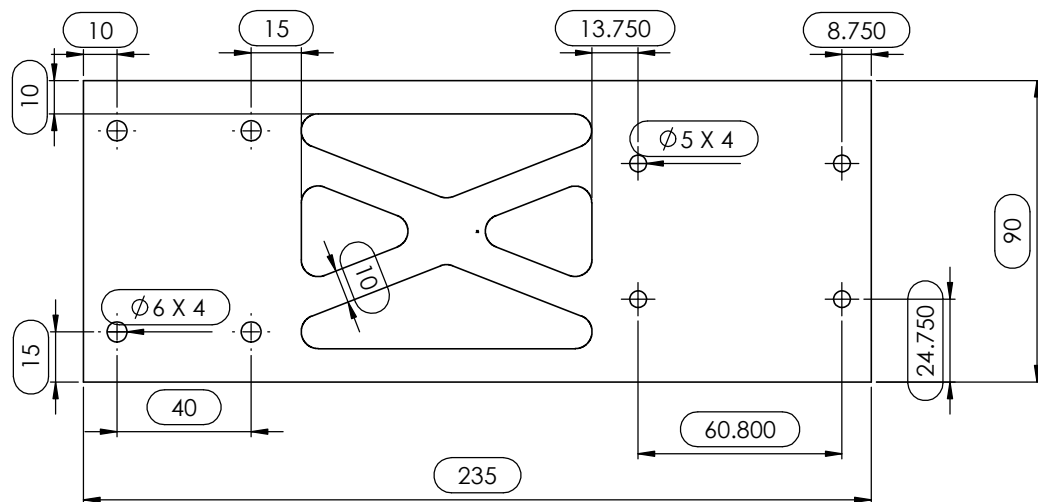
DETALLE A
ESCALA 2 : 1

NOTA:

EN ESTE ELEMENTO SE INTEGRARON DOS
RODAMIENTOS DE BOLAS NSK 6803DD. UNO
EN CADA CAJA.



TÍTULO:		
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA		
N.º DE DIBUJO	BASE RIEL	A3
ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1	



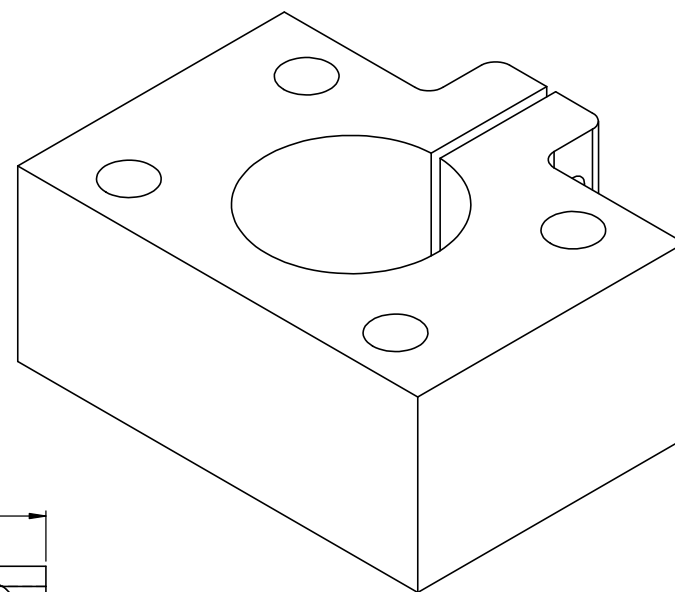
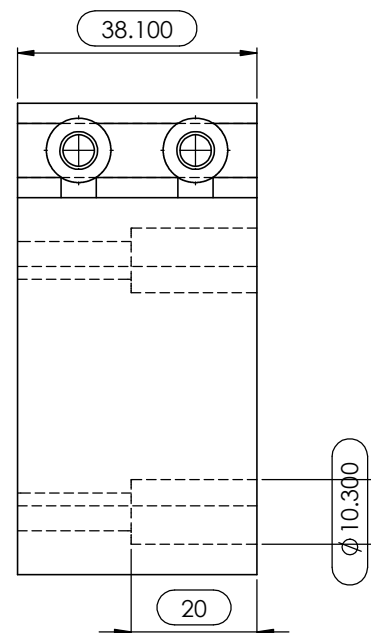
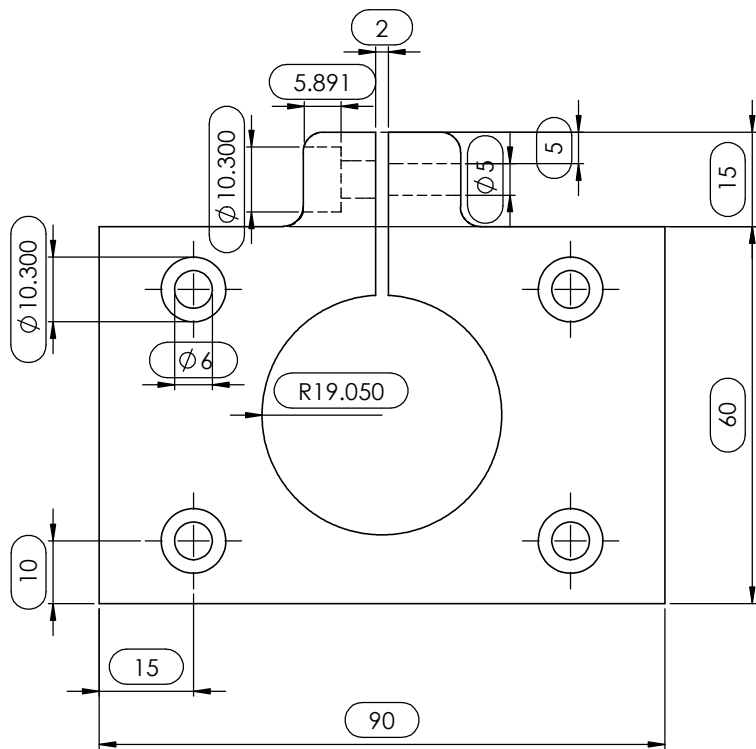
TÍTULO:
FACULTAD DE CIENCIAS DE
LA ELECTRÓNICA

N.º DE DIBUJO
BASE FINAL

A3

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



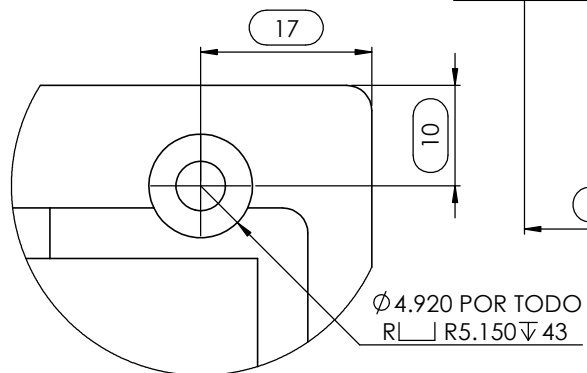
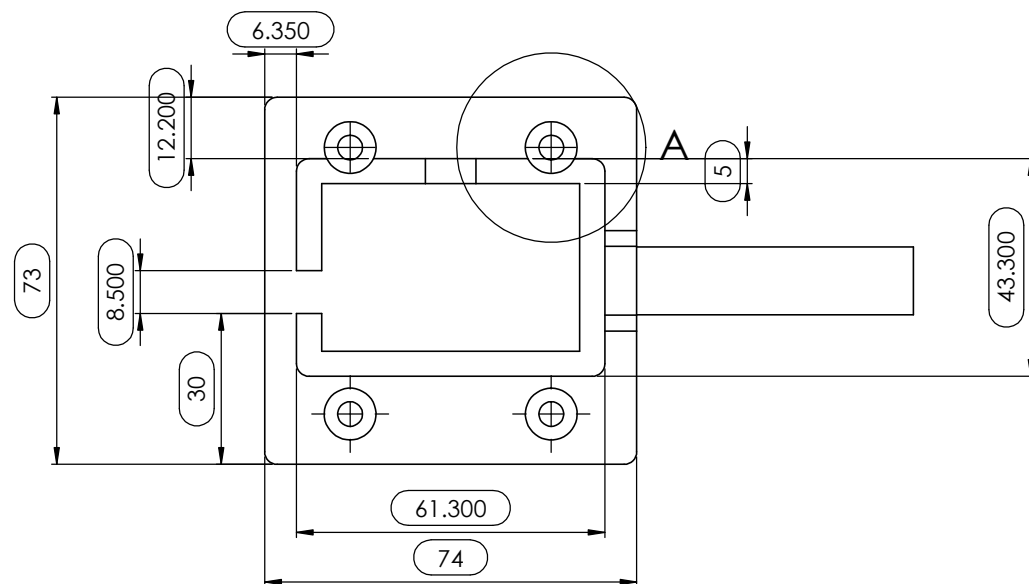
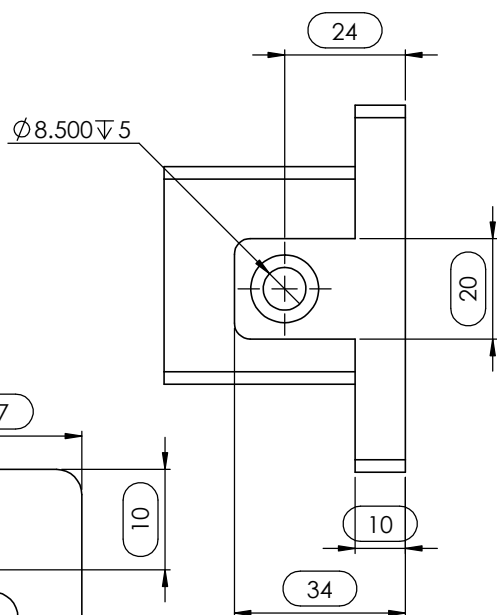
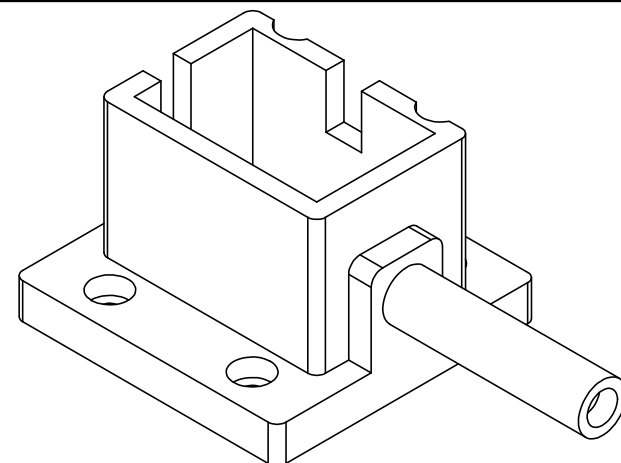
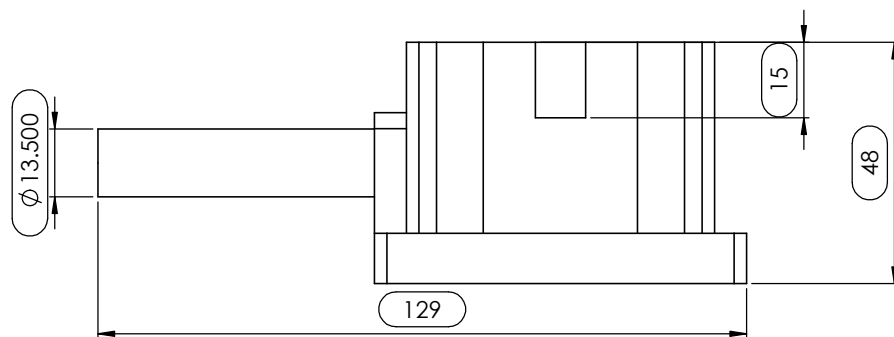
TÍTULO:
FACULTAD DE CIENCIAS DE
LA ELECTRÓNICA

N.º DE DIBUJO
AGARRE GATO

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

A3



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

NOTA:
PIEZA FABRICADA POR IMPRESIÓN
3D, PLA 50%.



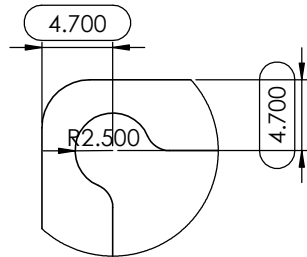
TÍTULO:
FACULTAD DE CIENCIAS DE
LA ELECTRÓNICA

N.º DE DIBUJO
CAJA S. SUSTENTACION

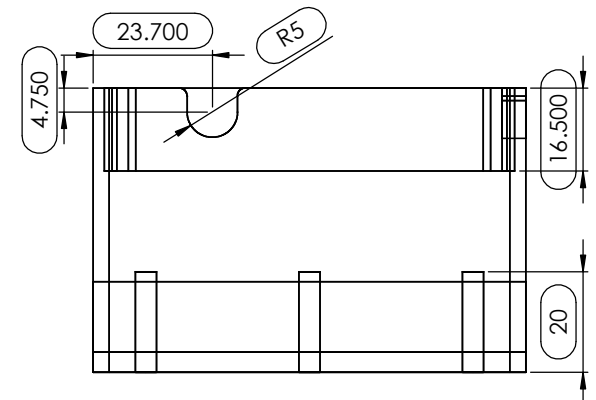
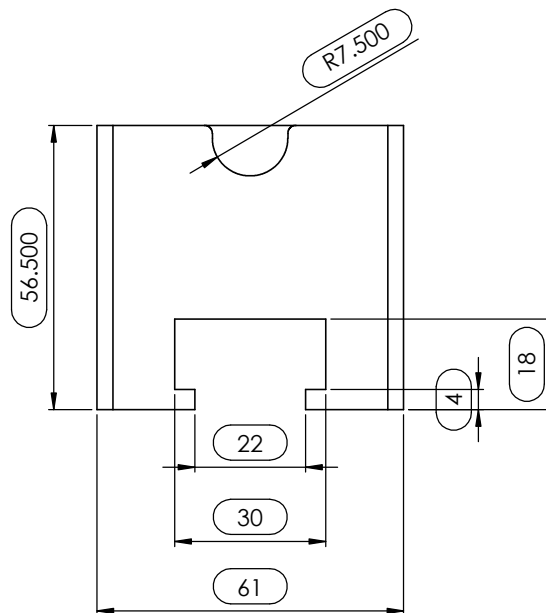
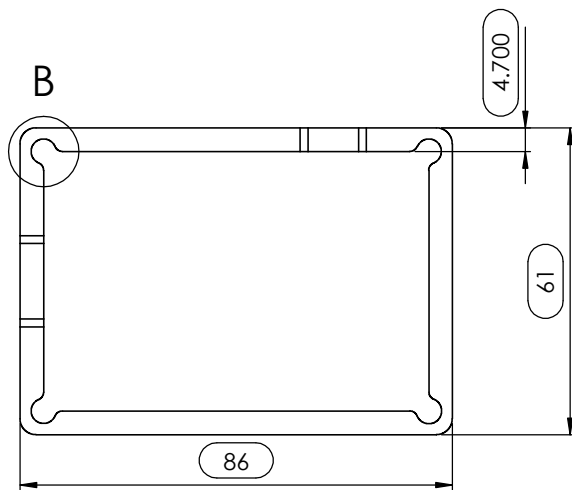
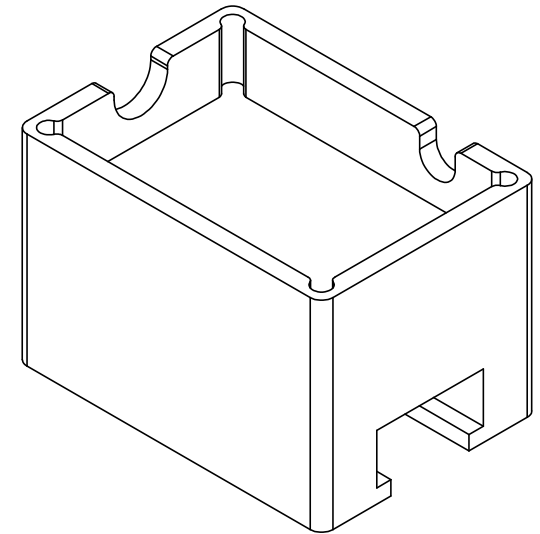
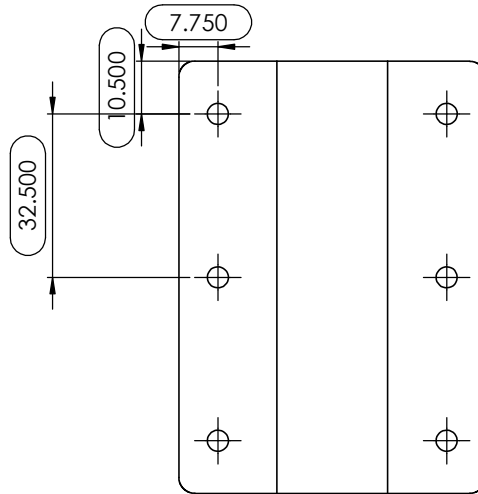
A3

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1



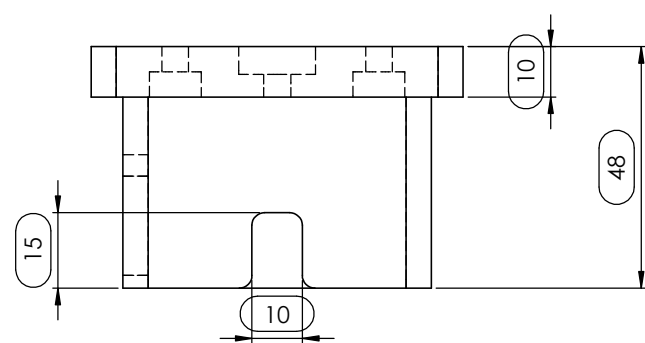
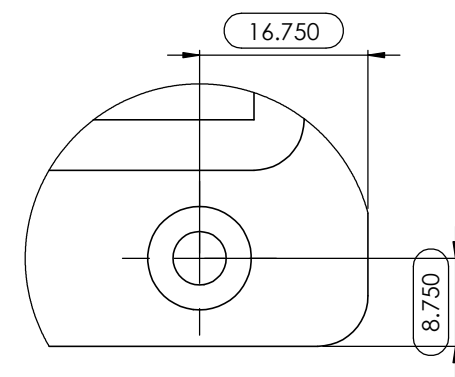
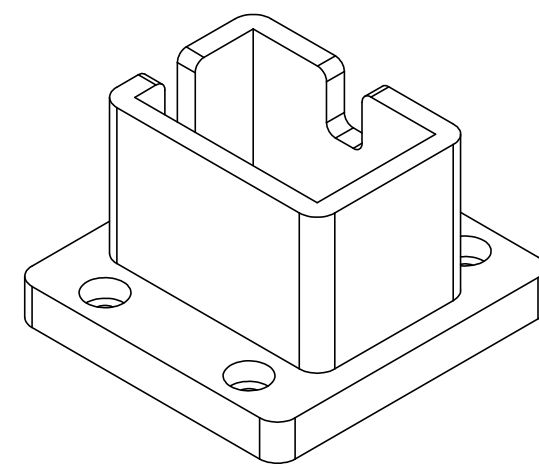
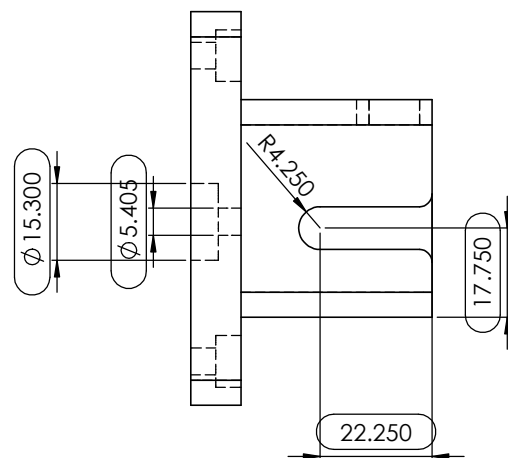
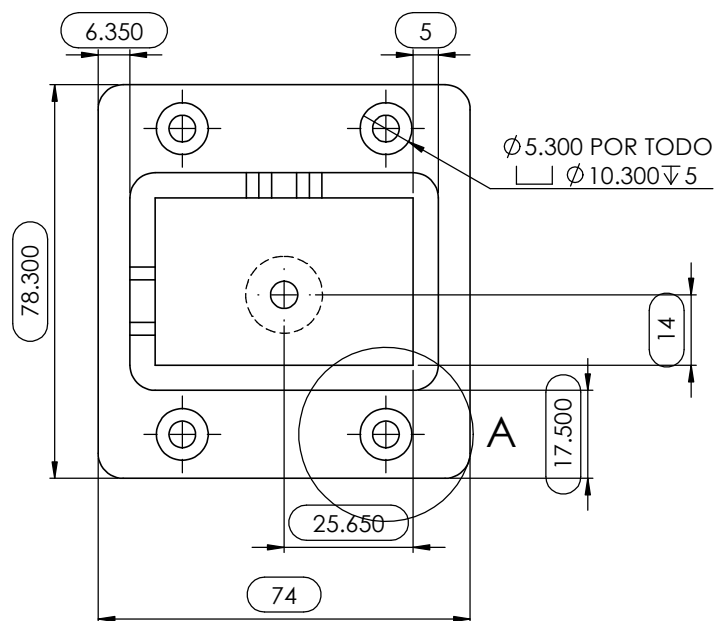
DETALLE B
ESCALA 3 : 1



NOTA:
PIEZA FABRICADA POR IMPRESIÓN
3D, PLA 50%.



TÍTULO: FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA		
N.º DE DIBUJO CAJA ARRASTRE	A3	
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1	

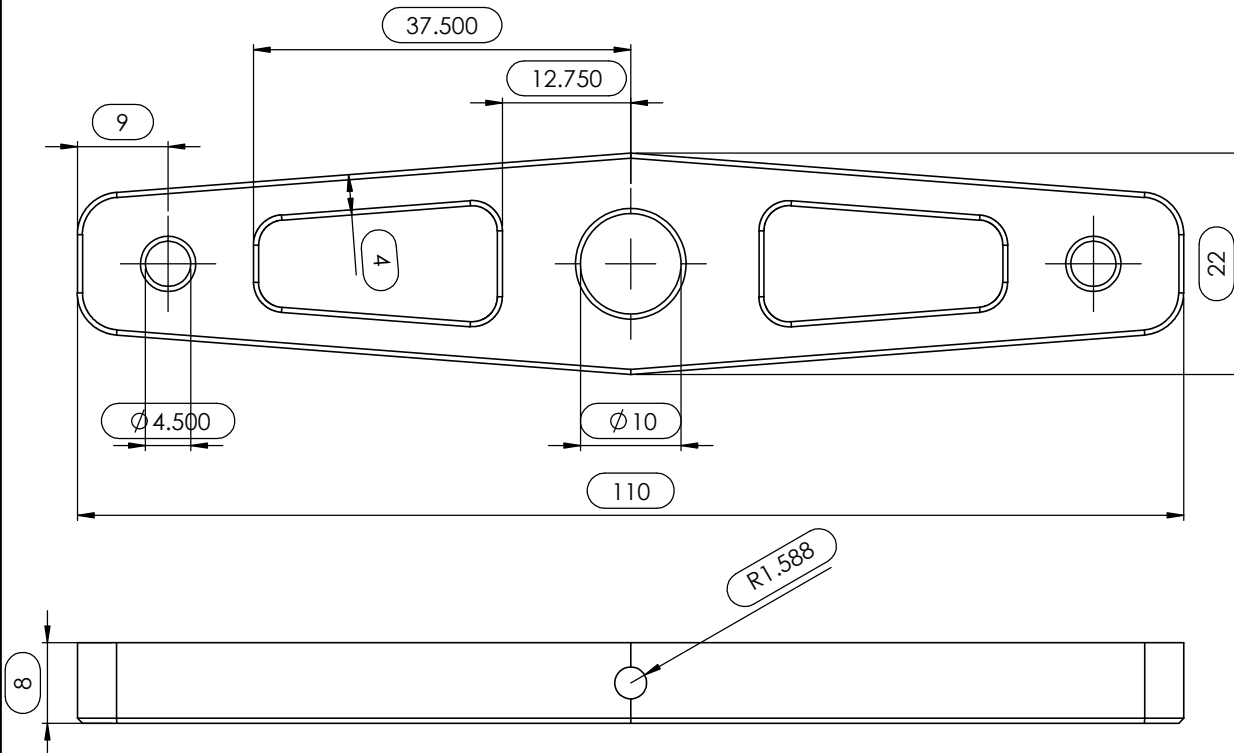
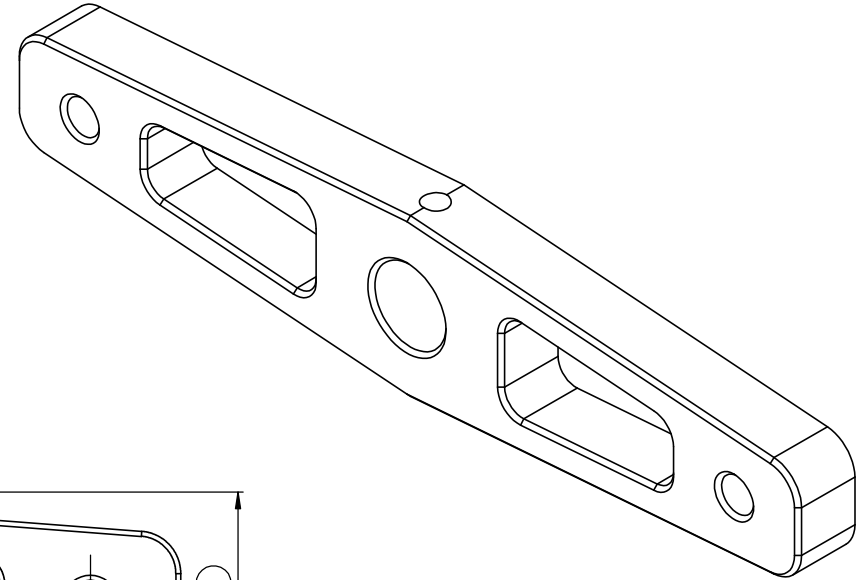


NOTA:
PIEZA FABRICADA POR IMPRESIÓN
3D, PLA 50%.



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

TÍTULO: FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA	
Nº DE DIBUJO CAJA CABECEO	A3
ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 1



TÍTULO: FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA		
N.º DE DIBUJO	A3	
PIEZA DE MONTAJE		
ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1	

B. Resultados de la prueba sobre el vehículo Jaguar XKR

A continuación se adjunta una copia del reporte generado por el instrumento virtual de la prueba sobre el vehículo Jaguar XKR.

Resultados de la prueba del automovil Jaguar XKR

Voltaje (V)	Ws (m/s)	Sustentación (N)	Arrastre (N)	Cabeceo (N)	Temp. (°K)	HR	Presión (Pa)	Rho (kg/m3)
0	-0.51719	10.013483	0.643082	15.713202	296.9245	0.4253	79840	0.93694
0.25	-0.32513	10.023979	0.665939	15.691211	296.94	0.4249	79839	0.93688
0.5	-0.13308	10.019981	0.651725	15.713702	296.9555	0.4246	79838	0.93682
0.75	0.058974	10.011484	0.676024	15.704206	296.971	0.4242	79837	0.93676
1	0.25103	10.02048	0.707525	15.714202	296.9865	0.4239	79836	0.9367
1.25	0.44308	10.000488	0.714632	15.684214	297.002	0.4235	79835	0.93665
1.5	0.63513	10.015982	0.713479	15.629736	297.0175	0.4232	79834	0.93659
1.75	0.82719	10.006986	0.73384	15.697209	297.033	0.4228	79834	0.93653
2	1.0192	10.023979	0.745941	15.696709	297.0485	0.4225	79833	0.93647
2.25	1.2113	10.000488	0.739602	15.712703	297.064	0.4221	79832	0.93641
2.5	1.4033	10.010984	0.738161	15.701707	297.0795	0.4218	79831	0.93635
2.75	1.5954	10.009485	0.738258	15.708704	297.095	0.4214	79830	0.93629
3	1.7875	10.005986	0.736241	15.705206	297.1105	0.4211	79829	0.93623
3.25	1.9795	10.012484	0.739506	15.712703	297.126	0.4207	79828	0.93617
3.5	2.1716	10.004987	0.743156	15.711203	297.1415	0.4204	79827	0.93611
3.75	2.3636	10.018481	0.765725	15.69471	297.157	0.42	79826	0.93605
4	2.5557	9.975998	0.775617	15.706705	297.1725	0.4197	79825	0.93599
4.25	2.7477	10.028977	0.78647	15.716201	297.188	0.4193	79825	0.93593
4.5	2.9398	9.979997	0.794345	15.735693	297.2035	0.419	79824	0.93587
4.75	3.1318	10.015482	0.792616	15.757685	297.219	0.4186	79823	0.93581
5	3.3239	10.030476	0.802028	15.751687	297.2345	0.4183	79822	0.93576
5.25	3.5159	10.022979	0.790983	15.777677	297.25	0.4179	79821	0.9357
5.5	3.708	10.039473	0.789351	15.953606	297.2655	0.4176	79820	0.93564
5.75	3.9	10.032476	0.801644	15.984094	297.281	0.4172	79819	0.93558
6	4.0921	10.035474	0.813073	15.963102	297.2965	0.4169	79818	0.93552
6.25	4.2842	10.025978	0.829111	15.950108	297.312	0.4165	79817	0.93546
6.5	4.4762	10.039473	0.852929	15.932115	297.3275	0.4162	79817	0.9354
6.75	4.6683	10.012484	0.869832	15.879136	297.343	0.4159	79816	0.93534
7	4.8603	10.033475	0.874826	15.876137	297.3585	0.4155	79815	0.93528
7.25	5.0524	10.016482	0.891825	15.870639	297.374	0.4152	79814	0.93522
7.5	5.2444	10.029477	0.909785	15.846149	297.3895	0.4148	79813	0.93516

7.75	5.4365	10.02248	0.91766	15.830655	297.405	0.4145	79812	0.9351
8	5.6285	10.025478	0.939269	15.873638	297.4205	0.4141	79811	0.93504
8.25	5.8206	10.013983	0.948585	15.864142	297.436	0.4138	79810	0.93499
8.5	6.0126	10.036974	0.953867	15.857145	297.4515	0.4134	79809	0.93493
8.75	6.2047	10.023479	0.951082	15.84415	297.467	0.4131	79809	0.93487
9	6.3967	10.028477	0.96107	16.127537	297.4825	0.4127	79808	0.93481
9.25	6.5888	10.026478	0.986713	16.180016	297.498	0.4124	79807	0.93475
9.5	6.7808	10.018981	0.995933	16.171519	297.5135	0.412	79806	0.93469
9.75	6.9729	10.02248	1.011779	16.167521	297.529	0.4117	79805	0.93463
10	7.165	10.015482	1.034445	16.157525	297.5445	0.4113	79804	0.93457