

DISEÑO DE UNA BALANZA PARA TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO

Alumno

José Miguel Sánchez López¹

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de Valencia

Director

Pedro Manuel Quintero Igeño²

Departamento de Motores y Máquinas Térmicas, Universidad Politécnica de Valencia

Codirector

Francisco González Pajuelo³

Departamento de Motores y Máquinas Térmicas, Universidad Politécnica de Valencia

A lo largo de este proyecto se lleva a cabo un estudio y diseño conceptual de una balanza para túnel de viento. En un primer lugar se introducirá el concepto teórico de balanza para túnel de viento y los objetivos que nos plantea el siguiente trabajo. Una vez se hayan establecido los objetivos y el concepto de la balanza se abordarán brevemente varios conceptos básicos de aerodinámica y aeronáutica. Posteriormente se tratará la teoría aerodinámica y se estudiarán los números adimensionales. Se realizará un recorrido por los tipos de túnel de viento y balanzas aerodinámicas que existen, además de diagnosticar el estado de la balanza actual y las posibles soluciones y/o alternativas. Por último plantearemos el diseño conceptual de la balanza aerodinámica propuesta.



¹ Graduado en Ingeniería Aeroespacial, josanlo9@etsid.upv.es

² Prof. Universidad – Ingeniero Aeronáutico, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, petquiig@mot.upv.es

³ Prof. Universidad – Ingeniero Industrial / Especialidad Mecánica, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, fgonz@mot.upv.es



Nomenclatura

ρ	=	densidad relativa
V	=	velocidad relativa
P	=	Presión estática
$P_{dinámica}$	=	Presión dinámica
$P_{estática}$	=	Presión estática
x_b	=	Dirección “x” ejes cuerpo
y_b	=	Dirección “y” ejes cuerpo
z_b	=	Dirección “z” ejes cuerpo
x_w	=	Dirección “x” ejes viento
y_w	=	Dirección “y” ejes viento
z_w	=	Dirección “z” ejes viento
L	=	Fuerza de Sustentación
S_w	=	Superficie mojada
CL	=	Coefficiente aerodinámico para la Sustentación
D	=	Fuerza de Resistencia
CD	=	Coefficiente aerodinámico para la Resistencia
$CD_{parásita}$	=	Coefficiente aerodinámico para la Resistencia parásita
$CD_{inducida}$	=	Coefficiente aerodinámico para la Resistencia inducida
CL_{α}	=	Coefficiente aerodinámico para la Sustentación debido al ángulo de ataque
$CL_{máx}$	=	Coefficiente aerodinámico para la Sustentación máximo
l	=	Longitud característica
g	=	Aceleración de la gravedad
μ	=	Viscosidad dinámica
Re	=	Número de Reynolds
$F_{inercia}$	=	Fuerza de inercia
$F_{viscosidad}$	=	Fuerza de viscosidad
M	=	Número de Mach
a	=	Velocidad de las ondas mecánicas en el fluido
L_{modelo}	=	Longitud característica del modelo
$L_{prototipo}$	=	Longitud característica del prototipo
$L_{relativa}$	=	Longitud característica relativa
V_{modelo}	=	Velocidad del modelo
$V_{prototipo}$	=	Velocidad del prototipo
$V_{relativa}$	=	Velocidad relativa
F_{modelo}	=	Fuerza sobre el modelo
$F_{prototipo}$	=	Fuerza sobre el prototipo
$F_{relativa}$	=	Fuerza relativa
Re_{modelo}	=	Número de Reynolds del modelo
$Re_{prototipo}$	=	Número de Reynolds del prototipo
M_{modelo}	=	Número de Reynolds del modelo
$M_{prototipo}$	=	Número de Reynolds del prototipo
m_m	=	Masa modelo
m_{prot}	=	Masa prototipo
a_m	=	Aceleración del modelo
a_{prot}	=	Aceleración del prototipo
ρ_m	=	Densidad del modelo
ρ_{prot}	=	Densidad del prototipo
l_m	=	Longitud característica modelo
l_{prot}	=	Longitud característica prototipo



- L_r = Longitud relativa
- T_r = Tensión superficie relativa
- A_r = Área sección característica relativa
- μ_m = Viscosidad dinámica del modelo
- μ_{prot} = Viscosidad dinámica del prototipo
- a, b, c, d, e, f = Fuerzas medidas en diversas células de carga para balanzas tipo
- x = Distancias del centro de resolución de la balanza tipo a la posición de la fuerza aplicada que genera el momento de cabeceo
- D, C, P, R, Y = Fuerzas medidas en diversas células de carga para balanzas tipo piramidal
- f = Distancias del centro de resolución de la balanza tipo piramidal a las fuerzas aplicadas P y R que generan el momento de cabeceo y alabeo respectivamente
- a = Distancias del centro de resolución de la balanza tipo piramidal a la fuerza aplicadas Y que genera el momento de guiñada
- $A1, A2, B$ = Fuerzas medidas por las células de carga vertical de la balanza diseñada
- C = Fuerza medida por la célula de carga horizontal de la balanza diseñada
- D = Fuerza medida por la célula de carga existente entre la placa de distribución y el actuador de la balanza diseñada
- $x_{DistD-DistCP}$ = Distancias del centro de presiones del modelo y la posición de la célula de carga existente entre la placa de distribución y el actuador de la balanza diseñada para obtener directamente el momento de cabeceo
- $x1$ = Distancias del centro de presiones del modelo y la posición de la célula de carga vertical A1 de la balanza diseñada
- $x2$ = Distancias del centro de presiones del modelo y la posición de la célula de carga vertical A2 de la balanza diseñada

ÍNDICE

I. Introducción Balanza Aerodinámica.....	9
II. Planteamiento del Problema.....	9
III. Objetivo General.....	9
IV. Objetivos Específicos.....	9
V. Limitaciones.....	10
VI. Alcances.....	10
VII. Metodología.....	10
VIII. Aerodinámica.....	11
A. Teorema de Bernoulli.....	11
B. Efecto Venturi.....	11
C. Perfil aerodinámico.....	12
D. Principio de vuelo.....	12
E. Ángulos a considerar.....	12
F. Longitudes características de un perfil aerodinámico.....	12
G. Centro de gravedad y centro aerodinámico.....	12
H. Sistema de coordenadas.....	13
· Ejes cuerpo.....	13
· Ejes viento.....	13
I. Fuerzas aerodinámicas.....	13
· Sustentación.....	14
· Resistencia.....	14
· Pérdida.....	15
J. Momento aerodinámicos.....	15
IX. Aeronáutica.....	17
A. Bataneo.....	17
B. Dispositivos Hipersustentadores.....	17
· Tipos de flaps.....	19
C. Spoilers.....	19
D. Aerofrenos.....	20
E. Winglets.....	20
F. Ala Delta.....	20
X. Teoría Aerodinámica y Números Adimensionales.....	22
A. Capa límite.....	22
· Capa límite lamiar.....	22
· Capa límite turbulenta.....	22
· Diferencias.....	22
B. Números Adimensionales.....	22

C.	Análisis Dimensional.....	23
D.	Modelo, Prototipo, Dimensiones y Unidades.....	23
E.	Teoría de la Semejanza.....	24
·	Semejanza geométrica.....	24
·	Semejanza cinemática.....	24
·	Semejanza dinámica.....	24
F.	Teorema de Pi Buckingham.....	24
XI.	Túnel de Viento.....	26
·	Túnel de circuito cerrado.....	26
·	Túnel de circuito abierto.....	26
·	Túnel de sección abierta.....	27
·	Túnel de sección cerrada.....	27
XII.	BALANZA AERODINÁMICA.....	28
A.	Balanzas externas.....	28
·	Balanza de alambre.....	28
·	Balanza de plataforma.....	29
·	Balanza de yugo.....	30
·	Balanza piramidal.....	31
B.	Balanzas internas.....	32
XIII.	DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO ORIGINAL.....	34
A.	Funcionamiento, componentes y accesorios.....	34
B.	Mantenimiento del equipo.....	35
C.	Observaciones generales del equipo.....	35
XIV.	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.....	36
·	Puesta a punto equipo actual.....	36
·	Diseño de equipo simple.....	36
·	Diseño de equipo completo.....	36
A.	Selección de la alternativa.....	36
XV.	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO (DISEÑO DE SISTEMA DE MEDICIÓN).....	37
A.	Especificaciones técnicas.....	37
B.	Alternativas de diseño.....	37
·	Balanza interna.....	37
·	Balanza externa.....	37
C.	Selección de la balanza.....	38
D.	Diseño de concepto.....	38
E.	Medición de fuerzas y presiones.....	39
F.	Sistemas y componentes.....	40
·	Sistema de montaje del modelo.....	40

· Sistema de medida	40
· Estructura.....	41
· Accesorios de medida.	42
· Implementación final.....	42
G. Cálculos básicos.	48
H. Selección de materiales.....	50
XVI. MANTENIMIENTO.....	52
XVII. CALIBRACIÓN.....	53
XVIII. COSTES FUTUROS.	54
A. Presupuesto fabricación de pieza adicionales.	54
B. Presupuesto de estructura y elementos de medida.	54
C. Coste total montaje.	55
XIX. CONCLUSIONES.....	56
XX. ANEXOS.....	57
A. Anexo 1: Planos acotados.....	57
B. Anexo 2: Fichas técnicas.....	58
Referencias de interés	59

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Efecto Venturi	11
Figura 2 Perfil inmerso en flujo de aire	12
Figura 3 Perfil inmerso en flujo de aire	12
Figura 4 Sistemas de coordenadas.....	13
Figura 5 Fuerzas aerodinámicas.....	14
Figura 6 Resistencia inducida	15
Figura 7 Giros.....	16
Figura 8 Efecto Flap.....	18
Figura 9 Efecto Slat.....	18
Figura 10 Tipos de flaps.....	19
Figura 11 Efecto Winglet.....	20
Figura 12 Flujo subsónico sobre ala Delta en incidencia.....	21
Figura 13 Capa límite desarrollada.....	22
Figura 14 Tipos de circuito de túnel.....	27
Figura 15 Túnel sección abierta.....	27
Figura 16 Túnel sección cerrada.....	27
Figura 17 Balanza de Alambre	29
Figura 18 Balanza de Alambre	30
Figura 19 Balanza de yugo	31
Figura 20 Balanza piramidal.....	32
Figura 21 Balanza interna	33
Figura 22 Balanza actual	35
Figura 23 Equipo adquisición datos actual.....	35
Figura 24 Diseño conceptual - Von Karman Institute for Fluid Dynamics.....	39
Figura 25 Balanza 3D - Von Karman Institute for Fluid Dynamics	40
Figura 26 Perfil “Fasten”.	42
Figura 27 Vista general descubierta izquierda.....	42
Figura 28 Vista general descubierta derecha.	43
Figura 29 Vista general descubierta al detalle.....	43
Figura 30 Vista general cubierta derecha.....	44
Figura 31 Vista general cubierta frontal.....	44
Figura 32 Vista derecha.....	45
Figura 33 Vista frontal.....	45
Figura 34 Vista inferior.	46
Figura 35 Vista izquierda.	46
Figura 36 Vista posterior.....	47
Figura 37 Vista superior.....	47
Figura 38 Balanza en detalle	48
Figura 39 Deformación.....	48
Figura 40 Deformación al detalle.....	49
Figura 41 Tensión de Von Mises.....	49
Figura 42 Células de carga LCM201.....	50
Figura 43 Sistema de adquisición de datos iNET-400.....	51
Figura 44 Actuador lineal eléctrico LA22.....	51

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Propiedades células de carga LCM201.	50
Tabla 2 Coste del material empleado.	54
Tabla 3 Recursos humanos empleados en la fabricación de las piezas.	54
Tabla 4 Material empleado en el montaje de las estructuras.....	55
Tabla 5 Recursos humanos en el montaje de las estructuras.....	55
Tabla 6 Coste total.....	55

I. Introducción Balanza Aerodinámica.

Una de las tareas a realizar en un túnel de viento es la medida de las diversas fuerzas y momentos que aparecen sobre un cuerpo al encontrarse inmerso en una corriente de aire. La obtención de estas fuerzas y momentos es una máxima en el diseño de cualquier prototipo de aeronave en sus primeros momentos de desarrollo. Las fuerzas y momentos que aparecen sobre el cuerpo inmerso pueden ser obtenidos de forma experimental gracias a las balanzas aerodinámicas. Este tipo de balanzas se diferencian de las convencionales en que son capaces de medir fuerzas a priori en direcciones desconocidas y además establecer los momentos que se generan sobre el cuerpo.

Los requisitos elementales de una balanza para túnel de viento son los siguientes:

- Alta sensibilidad: Es necesaria una apreciable señal eléctrica para una deformación dada, debemos conseguir que la mayor parte de la componente a medir sea tomada por el elemento de medición que actúa en esa dirección, el elemento de medición debe poseer una baja rigidez en la dirección de la componente a evaluar y la mayor rigidez posible en la otra dirección.
- Linealidad y Repetitividad: La balanza debe ser un sistema integrado entre sus partes, donde no ocurran desplazamientos relativos entre ellas, excepto aquellos causados por deformaciones elásticas; esto también hace referencia a el movimiento en las conexiones entre el modelo y la balanza.
- Baja histéresis: Para reducir este efecto, los elementos elásticos deben poseer un elevado módulo de Young, como pueden ser los aceros aleados de alta resistencia o bronce al berilio, ya que estos poseen buenas propiedades elásticas, poca deformación y elevada resistencia a fatiga.
- Baja interacción de los componentes: Esto se logra disminuyendo los desplazamientos del modelo causado por la deformación de los elementos sensores y el sistema de soporte. Se requerirá una elevada rigidez en los elementos que transmiten los esfuerzos.
- Baja sensibilidad a la temperatura: Esto asegura que los elementos estructurales y de medición de la balanza no sufran problemas de fatiga térmica, que se produce debido a las dilataciones y contracciones de los cuerpos físicos debido al aumento y disminución sucesiva de temperatura.

II. Planteamiento del Problema.

La Universidad Politécnica de Valencia, cuenta con una balanza aerodinámica capaz de medir dos de las seis componentes posibles.

La balanza que se acopla al túnel de viento, ha sido desarrollada para cubrir la necesidad de medir la fuerza que el viento puede ejercer sobre los elementos que se impongan en la zona de ensayo del túnel de viento. La balanza tiene grandes cualidades como la versatilidad, la independencia de ejes en la medida de la fuerza, el fácil armado y el rápido cambio de una pieza defectuosa.

La unidad básica de la balanza lo compone una célula de carga que puede aislar las fuerzas sobre un eje. Para componer las fuerzas la balanza posee tres células de cargas que se ubican de forma de poder aislar cada una de ellas un único eje. Por lo tanto mediante esta balanza se pueden medir las fuerzas sobre el eje "x" e "y", las cuales corresponden con la resistencia en el eje "x" y con la sustentación en el eje "y". Llevado a un avión esto supone poder medir las fuerzas aerodinámicas que posee una aeronave en pleno vuelo realizando distintas maniobras, de allí la versatilidad que posee esta balanza. El eje de aislamiento posee un sistema tal que al mover la células de carga no se provoquen fricciones en el sistema.

El principal inconveniente que existe en la balanza del túnel de viento es que únicamente es capaz de medir las fuerzas de sustentación y resistencia, lo cual limita mucho el estudio aerodinámico del cuerpo. Además, otro inconveniente a resaltar es la imprecisión que aportan sus resultados. Por último, del diagnóstico del equipo podemos resaltar el nivel de desgaste que han sufrido los diversos componentes que la conforman, aumentando así el nivel de error que se obtiene.

III. Objetivo General.

Como objetivo final del trabajo se propondrá un nuevo prototipo de balanza aerodinámica que aumente el nivel de exactitud en la medida y proporcione cinco componentes aerodinámicas, con el fin último de poder realizar todo tipo de futuros estudios de índole aerodinámico en túnel de viento.

IV. Objetivos Específicos.

- Profundizar en el conocimiento básico constructivo y de mantenimiento aeronáutico.
- Abordar temas de índole aeronáutico.

- Diagnosticar el equipo del que se dispone actualmente.
- Proponer la mejor solución para nuestro fin último.
- Desarrollar el diseño conceptual propuesto.

V. Limitaciones.

Las limitaciones presentes en este proyecto son en primer lugar la económica y en segundo lugar la de espacio. Se debe realizar un diseño de balanza aerodinámica lo más económica posible, pero el mayor problema para reducir costes es el elevado precio de las galgas extensiométricas que se integran para obtener la medida en la balanza de las cuales no se puede hacer nada para reducir su coste fijo en el mercado. Por último, la balanza debe adaptarse al túnel de viento del que dispone el Departamento.

VI. Alcances.

Se llevará a cabo el desarrollo teórico y constructivo de una balanza basada en galgas extensiométricas para medir las fuerzas y momentos aerodinámicos de un modelo en el túnel de viento.

La balanza aerodinámica será una balanza externa de tres componentes y deberá ser capaz de medir las fuerzas de sustentación, resistencia y lateral, así como los momentos de cabeceo y alabeo del modelo de estudio.

VII. Metodología.

La metodología empleada para el desarrollo del trabajo consta de los siguientes pasos:

1. Definición del problema.
2. Criterios y restricciones
3. Generación de posibles soluciones.
4. Descarte de soluciones no viables.
5. Selección de la mejor solución.
6. Especificaciones de la solución.
7. Documentación y comunicación.

Todo este proceso debe ir acompañado en todo momento de una exhaustiva búsqueda de información. Además, cabe resaltar que esta metodología empleada corresponde a un proceso iterativo, es decir, a un proceso en el que se repiten los pasos hasta obtener la solución más favorable e idónea.

VIII. Aerodinámica.

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia las acciones que aparecen sobre los cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que los baña, siendo este último un gas y no un líquido. Cuando se tiene un cuerpo inmerso en una corriente de gas, éste modifica la distribución de presiones y velocidades de las partículas del fluido, generando fuerzas de sustentación y arrastre.

La balanza aerodinámica será la que permita obtener las fuerzas y momentos aerodinámicos generados sobre el cuerpo de estudio. Este apartado se centra en una serie de principios físicos que permiten entender el origen de las fuerzas y momentos que aparecen sobre el cuerpo inmerso en una corriente de aire.

A. Teorema de Bernoulli.

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que “la presión interna de un de un fluido decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa”, o dicho lo mismo de otro modo “en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante”.

Se suele considerar el teorema de Bernoulli como una derivación de la ley de conservación de la energía. El aire esta dotado de presión, y este aire con una densidad fluyendo a una velocidad contiene energía cinética. Por la ley de conservación de la energía, la suma de ambas es una constante.

$$cte = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 + P = P_{dinámica} + P_{estática} \quad (1)$$

Basándose en este Teorema se puede intuir que si se consigue que sobre un cuerpo exista una mayor presión sobre el intradós, es decir, una menor velocidad de la corriente de aire, que sobre el extradós el cuerpo inmerso en la corriente tenderá a subir si se consigue que la resultante de la presión sea mayor que la fuerza de peso del cuerpo. La resultante de la presión será abordada en mayor profundidad en los sucesivos apartados, pero es la principal fuerza en el vuelo de una aeronave y de ella es de donde se derivan las fuerzas y momentos aerodinámicos que son las magnitudes que se desea medir para el estudio.

B. Efecto Venturi.

Este efecto consiste en comprobar que al hacer pasar un fluido por un estrechamiento, sus partículas aumentan su velocidad, disminuyendo su presión. Este efecto se explica por medio del teorema de Bernoulli y el principio de conservación de la masa. Si el caudal de un fluido es el mismo pero la sección transversal se reduce, necesariamente la velocidad debe aumentar y por consiguiente la presión se reduce.

En la Figura 1 podemos visualizar lo que sucede al producirse un estrechamiento de sección.

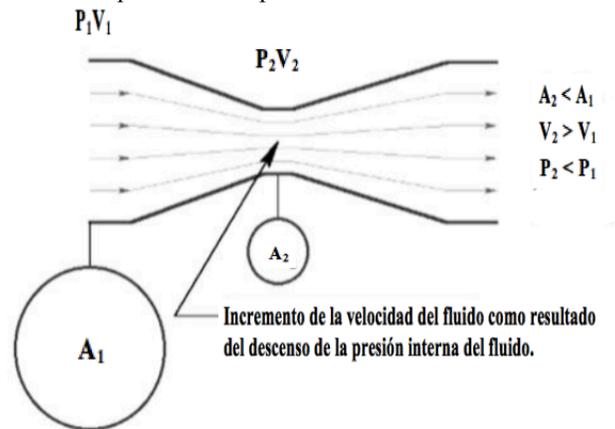


Figura 1 Efecto Venturi

De este efecto se deriva un problema muy recurrente en los túneles con una sección de ensayos limitada y cerrada, el denominado fenómeno de bloqueo. El bloqueo del flujo ocurre durante el ensayo con modelos relativamente grandes en la sección del túnel, la presencia del modelo tienen como resultado que al bloquear el flujo aumenta la presión en las paredes del túnel. Este bloqueo se define como el radio de la sección frontal del modelo al área de la sección de pruebas. Se necesitan radios menores del 10% de la sección y para las pruebas aerodinámicas, este bloqueo debe ser menor del 5%. Una posible solución para evitar este problema es el empleo de un túnel de sección de ensayos abierta.

C. Perfil aerodinámico.

En aeronáutica se denomina perfil aerodinámico a la forma transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a sus alrededor una distribución de presiones que genere sustentación.

Según el propósito que se persiga en el diseño, los perfiles pueden ser más finos o gruesos, curvos o poligonales, simétricos o no, e incluso el perfil puede ir variando a lo largo del ala.

D. Principio de vuelo.

El ala produce un flujo de aire en proporción a su ángulo de ataque (a mayor ángulo de ataque mayor es el estrechamiento en la parte superior del ala) y a la velocidad con que el ala se mueve respecto a la masa de aire que la rodea; de este flujo de aire, el que discurre por la parte superior del perfil tendrá una velocidad mayor (efecto Venturi) que el que discurre por la parte inferior. Esta mayor velocidad implica menor presión (teorema de Bernoulli).

Sobre el extradós del ala existe una menor presión que por el intradós del ala. Esta diferencia de presión produce una fuerza aerodinámica resultante que empuja el ala de la zona de mayor presión a la zona de menor presión, conforme a la Tercera Ley del Movimiento de Newton.

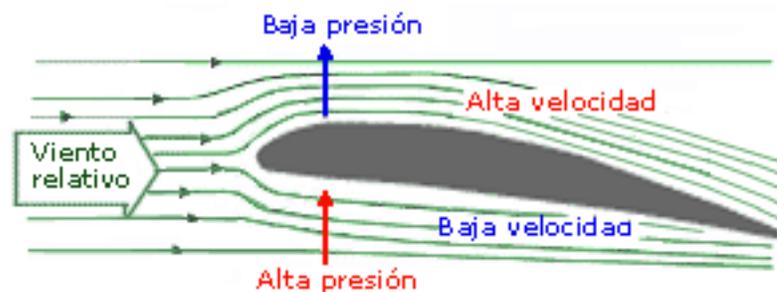


Figura 2 Perfil inmerso en flujo de aire

E. Ángulos a considerar.

- Ángulo de ataque (α): El ángulo que existe entre la superficie del perfil y la trayectoria que sigue el centro de gravedad del cuerpo. Es directamente proporcional a la fuerza de sustentación.
- Ángulo de incidencia: El ángulo agudo formado por la cuerda del ala con respecto al eje longitudinal del avión. Este ángulo es fijo, pues responde a consideraciones de diseño y no es modificable por el piloto.

F. Longitudes características de un perfil aerodinámico.

En la Figura 3 se puede observar sobre un perfil aerodinámico las longitudes y puntos de interés.

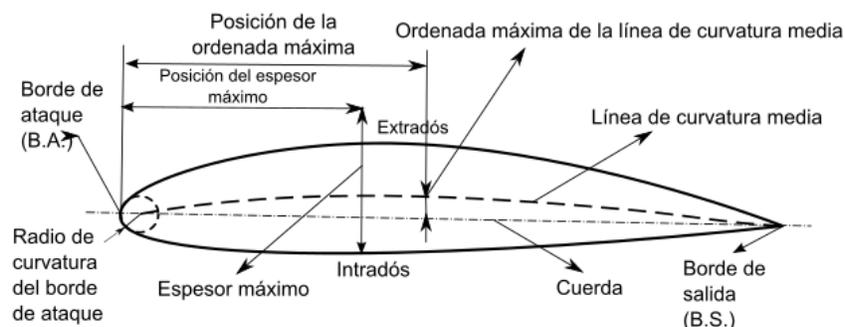


Figura 3 Perfil inmerso en flujo de aire

G. Centro de gravedad y centro aerodinámico.

El centro de gravedad es el punto en el cual se supone que se concentra toda la masa del cuerpo, mientras que el centro aerodinámico es el punto, sobre una línea de referencia de un perfil aerodinámico, ala, o avión respecto del cual el momento de cabeceo es independiente del ángulo de ataque, en el centro aerodinámico puede suponerse aplicada la sustentación total del avión debida al ángulo de ataque. La posición de ambos puntos es importante ya que de ellos depende la estabilidad longitudinal de cuerpo.

Si ambos puntos se encuentran en el mismo plano el modelo tiene estabilidad neutra. Si el centro de gravedad está detrás del centro aerodinámico el modelo toma la posición conocida como encabritado. Por el contrario, si el centro aerodinámico está por detrás del centro de gravedad el modelo toma la posición de picado. Es importante destacar que el centro aerodinámico también se conoce en algunas literaturas como centro de presiones.

Es el flujo de aire que produce el avión al desplazarse. El viento relativo es paralelo a la trayectoria de vuelo y de dirección opuesta. Su velocidad es la relativa del avión con respecto a la velocidad de la masa de aire en que este se mueve.

H. Sistema de coordenadas.

• Ejes cuerpo

Los ejes cuerpo se fijan al modelo y se mueven solidarios con él.

El punto de intersección de los ejes está situado sobre el centro de gravedad; son el eje transversal “ y_b ”, el longitudinal “ x_b ” y el vertical “ z_b ”.

- El eje longitudinal (eje x) *Roll*, alabeo, balanceo: Comienza en el morro o nariz del avión y se extiende a través de todo el fuselaje hasta llegar a la cola. El movimiento del avión sobre el eje “ x ” se denomina “alabeo o balanceo”.
- Eje lateral (eje y) *Pitch*, cabeceo: Se extiende a todo lo largo de la envergadura de las alas, es decir, de una punta a la otra. El movimiento sobre el eje “ y ” se denomina “cabeceo”.
- Eje vertical (eje z) *yaw*, guiñada: El eje vertical es un eje imaginario que, pasa por el centro de gravedad del avión, es perpendicular a los ejes transversal y longitudinal. El movimiento sobre el eje vertical se denomina “guiñada”.

• Ejes viento

Los ejes de viento consisten en: “ x_w ” en dirección paralela al viento y sentido contrario, “ z_w ” en dirección perpendicular al viento y sentido hacia abajo y “ y_w ” en dirección perpendicular al viento y hacia la izquierda visto desde la dirección del viento. Por lo tanto, la resistencia es negativa para la dirección del eje “ x_w ” y la sustentación es negativa para la dirección del “ z_w ”, mientras que la fuerza lateral es positiva en la dirección del eje “ y_w ”.

En la Figura 4 se pueden ver impresionados sobre una sección de ensayos los ejes viento y sobre un modelo los ejes cuerpo.

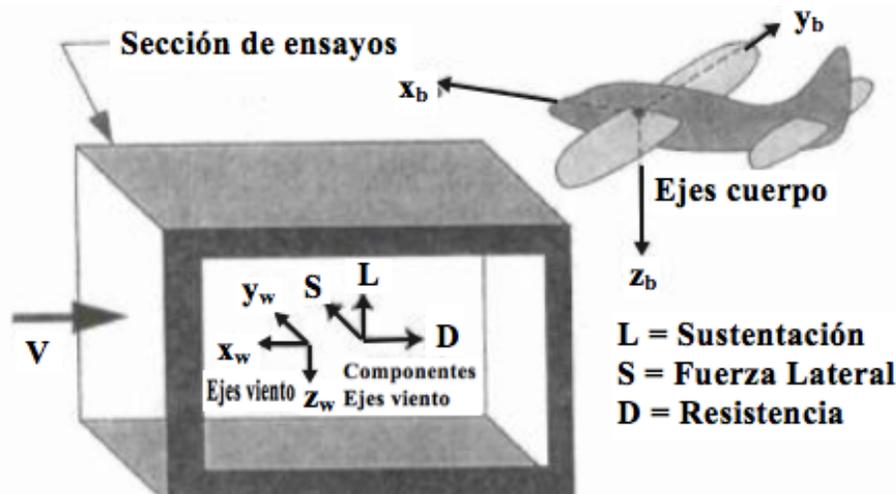


Figura 4 Sistemas de coordenadas

I. Fuerzas aerodinámicas.

Las fuerzas que se obtendrán son la sustentación y la resistencia, que se pueden derivar de la descomposición vectorial de la fuerza resultante al incidir una corriente de aire sobre un cuerpo. En una situación de vuelo real aparecerán además la fuerza de peso, debido a la gravedad, que deberá ser compensada por la sustentación y la fuerza de tracción o empuje, que deberá ser superior a la fuerza de resistencia para poder avanzar en vuelo.

Nos limitaremos a estudiar las fuerzas que se van a medir en el túnel de viento, que son las que se obtienen de descomponer la fuerza resultante provocada por una diferencia de presiones sobre el cuerpo que es sometido a una corriente de aire (teorema de Bernoulli). Las fuerzas descompuestas se pueden observar en la Figura 5 y se definen del siguiente modo:

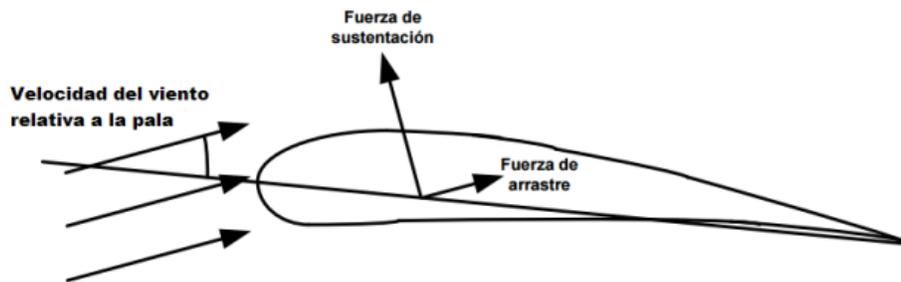


Figura 5 Fuerzas aerodinámicas.

• Sustentación

Es la fuerza desarrollada por un cuerpo sumergido en una corriente de flujo (en nuestro caso una corriente de aire), ejercida de abajo arriba, y cuya dirección es perpendicular al flujo incidente. Se representa con la letra L por su traducción al inglés *Lift*.

La fuerza de sustentación se puede ver afectada por varios factores:

- La forma del perfil del ala. A mayor curvatura del perfil, hasta cierto punto, mayor diferencia de velocidad entre las superficie superior e inferior del ala y por tanto mayor diferencia de presión. Para el caso de ángulo de ataque nulo, para un perfil simétrico (misma curvatura tanto por extradós como por intradós) no aparecerá fuerza de sustentación, mientras que para un perfil con curvatura el perfil sustentará. Un perfil ligeramente curvado entra en pérdida con un ángulo de ataque mayor que un ala simétrica.
- La superficie alar. Cuanto mayor superficie alar se disponga mayor será la superficie sobre la que se ejerce la fuerza de sustentación. Debe de existir un compromiso con el peso y la resistencia ya que al aumentar mucho la envergadura también se incrementan estas fuerzas.
- La densidad del fluido. A mayor densidad del flujo, mayor es el número de partículas por unidad de volumen que cambian velocidad por presión y producen sustentación.
- Velocidad del fluido relativo. A mayor velocidad de flujo incidente sobre el perfil, mayor sustentación. Afecta cuadráticamente a la sustentación y por tanto es el valor más determinante.
- Ángulo de ataque. Si se aumenta el ángulo de ataque es como si se aumentará la curvatura del perfil y por tanto la diferencia de presiones entre extradós e intradós.

En forma de ecuación la sustentación se expresa del siguiente modo:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_w \cdot CL \quad (2)$$

• Resistencia

La resistencia es la fuerza que se opone al avance del perfil. La resistencia actúa de forma paralela y la misma dirección que el flujo de fluido relativo incidente. Se representa con la letra D por su traducción al inglés *Drag*.

La resistencia aerodinámica se puede dividir en cuatro tipos que a su vez se engloban por parejas:

1. Resistencia parásita, debida a la viscosidad del aire. Está compuesta por:
 - Resistencia por fricción: Debido al rozamiento de las moléculas del aire con la superficie del objeto sólido.
 - Resistencia por presión: Producida por la estela de baja presión cuando el flujo está desprendido.
2. Resistencia debida a la presión.
 - Resistencia inducida: Se debe a los torbellinos de punta del ala. Es un producto de la sustentación, y se incrementa en proporción directa al incremento del ángulo de ataque. En la Figura 6 se puede comprobar cuál es la resistencia inducida.

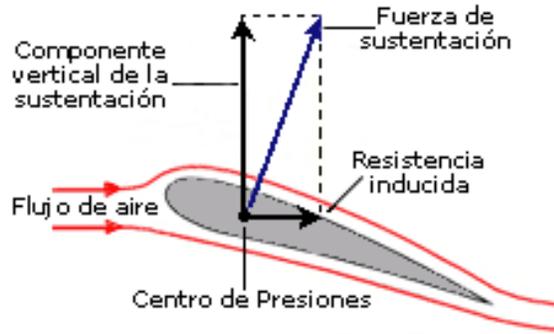


Figura 6 Resistencia inducida

- Resistencia de onda: Se debe a la estela de las ondas de choque.

La suma de la resistencia inducida y la resistencia parásita nos proporciona el valor de la resistencia total, ya que son las más influyentes:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_w \cdot CD \quad (3)$$

$$CD = CD_{parasita} + CD_{inducida}$$

• Pérdida

Entrada en pérdida de un ala o un perfil. Situación generada cuando un ala es sometida a un ángulo de ataque demasiado elevado. La corriente se desprende y el ala pierde sustentación, porque el ala sigue sustentando aunque menos. La Resistencia aerodinámica aumenta.

El ángulo de ataque máximo al que se produce la entrada en pérdida será una de las características que se podrán determinar gracias a la medición de las fuerzas aerodinámicas. Este ángulo de ataque crítico será aquel en el cual un incremento de ángulo de ataque no se traduce en un aumento de la sustentación.

J. Momento aerodinámicos.

Los momentos resultantes son la fuente de los cambios de actitud, de las rotaciones. Es habitual definir estas tres componentes de momento:

- Momento de alabeo: El que hace que el vehículo gire alrededor de su eje longitudinal (“ x_b ”). Permite al avión hacer giros o virajes.
- Momento de cabeceo: El que hace que el vehículo gire alrededor de su eje transversal horizontal (“ y_b ”). Permite al avión que ascienda o descienda.
- Momento de guiñada: El que hace que el vehículo gire alrededor de su eje transversal vertical (“ z_b ”). Tiene como objetivo permitir giros en tierra y equilibrar las fuerzas de la aeronave en vuelo cuando se hacen virajes.

En la Figura 7 se visualiza los giros que existen con respecto a los ejes cuerpo.

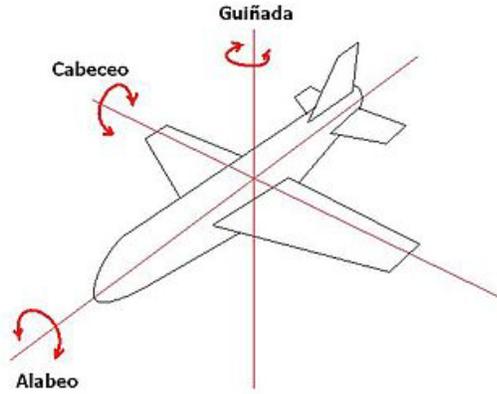


Figura 7 Giros

IX. Aeronáutica.

La aeronáutica es la disciplina que se dedica al estudio, diseño y manufactura de aparatos mecánicos capaces de elevarse en vuelo, así como el conjunto de las técnicas que permiten el control de aeronaves. La aeronáutica también engloba la aerodinámica.

Este apartado se justifica en la necesidad del estudio de ciertos elementos constructivos sobre un avión, de los cuales se pueden estudiar sus efectos, ventajas y desventajas para el vuelo gracias a la estimación de fuerzas y momentos aerodinámicos mediante la balanza del túnel de viento.

A. Bataneo.

Es una inestabilidad de altas frecuencias causada por la desconexión del flujo de aire de un flap u oscilaciones de onda de choque. Se trata de una vibración forzada aleatoria. El centro aerodinámico se desplaza momentáneamente, inicialmente hacia delante y después hacia atrás generando la vibración mencionada.

Antes de alcanzar la pérdida el avión se verá afectado por fenómenos y comportamientos particulares, que están indicando la proximidad de una condición crítica. Es pues tan importante como la pérdida de baja velocidad o de alta velocidad, el conocimiento de estos fenómenos indicadores de su proximidad. A esto se le conoce como límite inicial de bataneo y a su velocidad correspondiente como velocidad inicial de bataneo.

B. Dispositivos Hipersustentadores.

Los dos elementos fundamentales que se utilizan para incrementar el coeficiente de sustentación de un ala son el “slat” o flap (de borde de ataque) y el “flap” de borde de salida del ala. Los efectos de los dispositivos hipersustentadores son en una parte del proceso de diseño estudiados en túnel de viento para alcanzar la solución más óptima. Hoy en día se siguen creando nuevos diseños y tipos a fin de obtener soluciones más optimizadas.

En general actúan aumentando:

- La curvatura de los perfiles.
- El control de la capa límite.
- El área efectiva del ala.
- La cuerda del perfil.

El flap y el slat no actúan del mismo modo para lograr incrementar el coeficiente de sustentación.

El flap produce en el ala un aumento de la curvatura introducida por la deflexión del dispositivo, que causa un aumento del coeficiente de sustentación del perfil, tal como se puede ver en la Figura 8.

En esa misma figura se observa que además del desplazamiento hacia arriba de la curva de sustentación, se produce un aumento del valor máximo del coeficiente de sustentación y una variación del ángulo de sustentación nula. El Cl de mínima resistencia también se ve alterado.

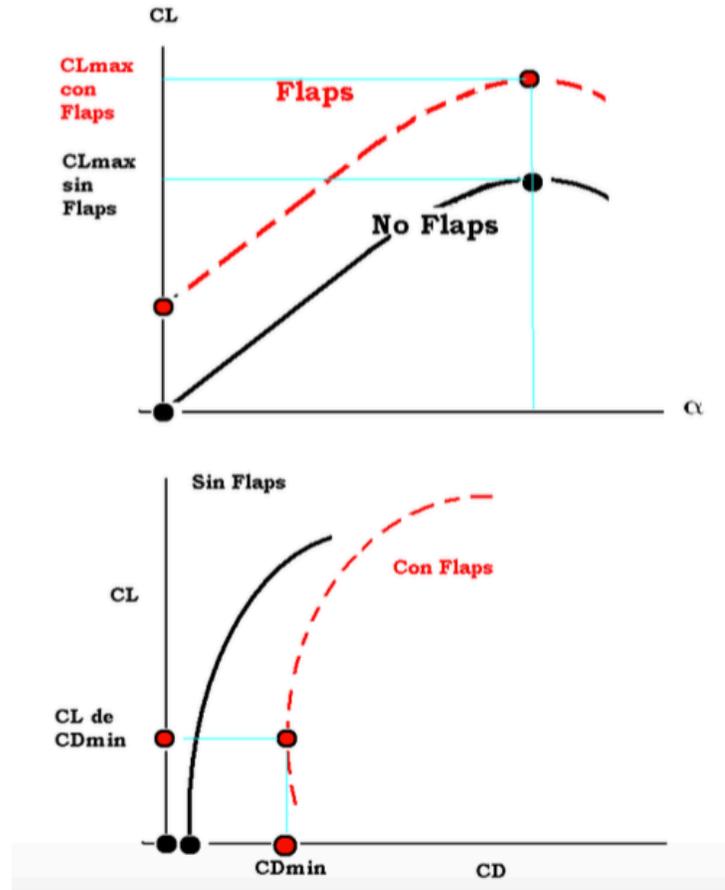


Figura 8 Efecto Flap

El efecto del slat consiste en que aumenta el CL_{max} que se puede alcanzar, sin variar el valor de la CL_{α} . Por tanto, como se puede ver en la Figura 9, la aeronave entrará en pérdida con mayor ángulo de ataque, lo que es favorable.

Ambos dispositivos tienen efecto sobre la resistencia aerodinámica, y este efecto será proporcional a la deflexión de los flaps, lo que llevará a utilizar deflexiones de flaps moderadas en configuración de despegue para aprovechar mejor la aceleración proporcionada por los motores. El aumento de la resistencia es más patente en la inducida por la sustentación.

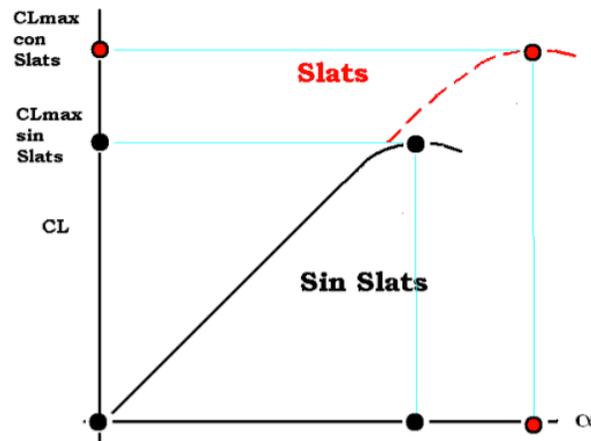


Figura 9 Efecto Slat

- **Tipos de flaps**

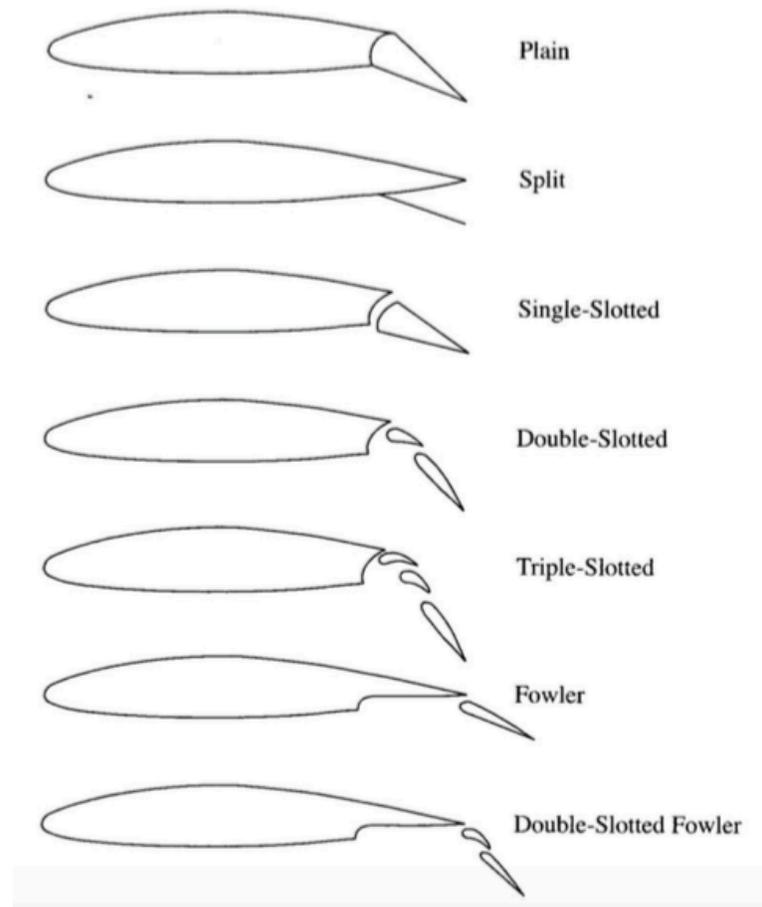


Figura 10 Tipos de flaps

En la Figura 10 se pueden observar todos los tipos de flaps que nos podemos encontrar ha día de hoy, de algunos de ellos podemos resaltar las siguientes características:

- Plain: Aumentan la curvatura del ala y por consiguiente consiguen aumentar la sustentación.
- Split: Aumentan la resistencia del perfil sin generar aumenta en la sustentación.
- Slotted: Mejoran el efecto del Plain, ya que aumentan más la curvatura del perfil al aprovechar la abertura existente (slot) para dar más energía a la capa límite.
- Fowler: Son los que aportan un mayor rendimiento ya que se despliegan hacia atrás y hacia abajo, aumentando la superficie alar y la curvatura del perfil. Produce en comparación con los anteriores, mayor sustentación y menor resistencia.
- Slotted Fowler: Combinación de los dos tipos de flaps anteriores.

C. Spoilers.

Al igual que se realiza el estudio en túnel de viento sobre los dispositivos hipersustentadores también es posible realizarlo en los Spoilers. Se trata de un dispositivo cuyo objetivo es reducir la fuerza de sustentación de una aeronave. Los spoilers son placas montadas en la cara superior de las alas de un avión, que pueden desplegarse hacia arriba modificando el flujo laminar. Con esto, el spoiler provoca una entrada en pérdida controlada sobre la porción del ala situada tras él, reduciendo notablemente la sustentación y aumentando la resistencia. Gracias a ellos se controlan lo virajes, mientras uno sube el otro baja generando más fricción de un lado que del otro, provocando el alabeo.

D. Aerofrenos.

Dispositivos diseñados para facilitar el descenso y controlar el aterrizaje de los aviones. Se ubican alejados de la cuerda alar para no perturbar el flujo de aire hacia la cola del aeronave. Estos dispositivos se estudian comprobando su efecto sobre la resistencia, ya que, a medida que descendemos se desea reducir la velocidad para realizar una maniobra de redondeo y finalmente aterrizar lo más suave posible.

E. Winglets.

Se puede reducir la resistencia inducida mediante winglets añadidos a la punta de ala. Este efecto puede ser corroborado mediante un perfil alar sin winglet y un perfil alar con winglet en el túnel de viento.

Se tratan de una superficie sustentadora diseñada con cuidado para minimizar peso, resistencia de forma y resistencia de compresibilidad.

La corriente del intradós, al rebordear en punta de ala, se encuentra con la superficie del winglet y genera una fuerza lateral sobre éste, dirigida hacia delante, debido al ángulo de inclinación. El ángulo de inclinación responde a un compromiso entre la eficiencia inducida por un aumento de la sustentación y la resistencia por la interacción ala-winglet.

Por su forma, permite reducir el tamaño de los vórtices de punta del ala, como podemos apreciar en la Figura 11, y por tanto reducir la resistencia inducida. Además, al permitir que los torbellinos de punta del ala se alejen de la superficie del ala, se evita que éstos interfieran con la capa límite del ala y generen desprendimiento en punta del ala.



Figura 11 Efecto Winglet

F. Ala Delta.

El ala Delta se desarrolló para condiciones de flujo supersónico. Sin embargo, los aviones que las incorporan vuelan gran parte del tiempo en condiciones subsónicas, por lo cual interesa conocer su comportamiento, bien distinto al de las convencionales.

Cuando incide sobre un ala Delta un flujo subsónico el en borde de ataque afilado, la corriente tiende a enrollarse hacia el extradós. El flujo se desprende todo a lo largo del borde de ataque afilado, se enrolla en un torbellino

primario en el extradós, justo en el interior del borde de ataque y readhiere de nuevo. Un torbellino secundario se forma debajo del primario y se readhiere. Las líneas de corriente de superficie tienden a alejarse de las líneas de adherencia y fluyen hacia las líneas de desprendimiento, a lo largo de las cuales se desprenden. Entre los vórtices de los bordes de ataque, las líneas de corriente de superficie que salen del vértice del ala quedan adheridas y fluyen en línea recta sin verse perturbadas.

Los vórtices de los bordes de ataque son intensos y estables y generan una depresión en la zona del borde de ataque. Salvo en la zona de los bordes de ataque, la distribución de presión es relativamente constante, tanto en el intradós como en el extradós.

El efecto de succión generados en el extradós por los vórtices de los bordes de ataque aumenta la sustentación, incluso a ángulos de ataque altos donde un ala convencional ya habría entrado en pérdida. Sin embargo, la pendiente de CL es pequeña, con lo cual, un avión de ala Delta tiene que despegar y aterrizar con gran ángulo de ataque para conseguir la sustentación necesaria.

Los vórtices de los bordes de ataque también generan un aumento de la resistencia inducida y de presión, y no son beneficiosos desde el punto de vista de la eficiencia aerodinámica.

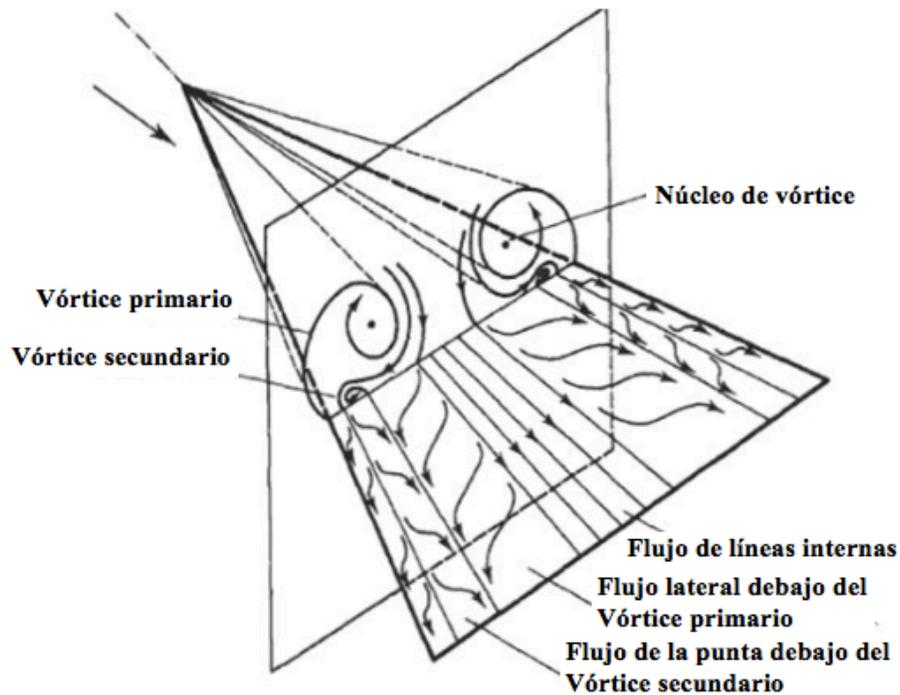


Figura 12 Flujo subsónico sobre ala Delta en incidencia

X. Teoría Aerodinámica y Números Adimensionales.

A. Capa límite.

Las fuerzas aerodinámicas dependen de la viscosidad del fluido de una manera compleja. Conforme el fluido se mueve sobre una superficie, las moléculas adyacentes se pegan a la misma. Esto crea una delgada capa de fluido cerca de la superficie en la que la velocidad cambia de cero hasta la velocidad sin perturbar. Se denomina a esta capa la capa límite porque ocurre en el límite del flujo, y a la distancia de la capa completa de fluido se le denomina espesor de la capa límite.

- **Capa límite lamiar**

El flujo estacionario, unidimensional, de un fluido en que las capas contiguas se deslizan unas sobre otras, sin corrientes transversales ni torbellinos, es decir sin mezcla laminar.

- **Capa límite turbulenta**

El movimiento de las partículas se desplaza en sentidos diferentes del movimiento principal del fluido. La aparición de turbulencia en la capa límite se caracteriza por un incremento brusco del espesor de la misma.

- **Diferencias**

Las capas límite serán laminares o turbulentas dependiendo del número de Reynolds. No existe una teoría exacta para estudiar la transición, de hecho, cualquier irregularidad puede hacer que una capa límite laminar se vuelva turbulenta.

La capa límite turbulenta genera una mayor resistencia parásita que la capa límite laminar. El flujo laminar minimiza la resistencia de fricción.

Las capas límite turbulentas tienen más energía, por lo que puede sobreponerse a gradientes de presión adversos y mantenerse adherida a la superficie.

En la Figura 13 podemos observar una capa límite desarrollada.

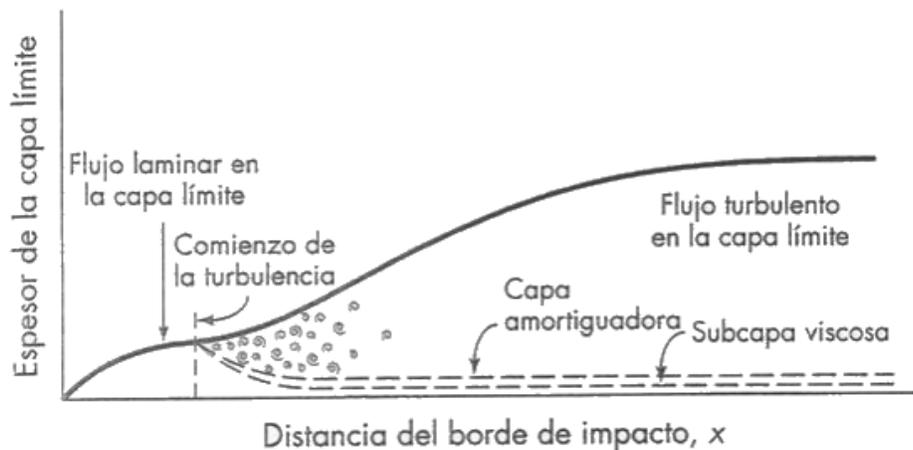


Figura 13 Capa límite desarrollada

Cuando la capa límite comienza a fluir por el borde de ataque, por ejemplo, de un perfil aerodinámico de estudio, lo hace de forma de capa laminar, pegada al perfil y muy fina; pero a medida que fluye hacia el borde de salida, más o menos por el centro del perfil, comienza a perder velocidad debido a la fricción y va haciendo formando la capa turbulenta, más separada del ala y con más grosor. Mientras la capa es laminar, se mantiene pegada al perfil y produce sustentación, pero al convertirse en turbulenta aumenta su separación con el perfil y no produce sustentación. El punto en el cual la capa laminar se va convirtiendo en turbulenta e incrementa su grosor se denomina “transición a turbulencia”.

B. Números Adimensionales.

Cuando un cuerpo se mueve a través de un fluido experimenta fuerzas debidas a la viscosidad del medio, a la elasticidad, a la inercia y a la fuerza gravitatoria. Las fuerzas mencionadas pueden escalarse de la siguiente forma:

$$\text{Fuerzas de inercia} \propto \rho \cdot l^2 \cdot V^2 \quad (4)$$

$$\text{Fuerzas debidas a la viscosidad} \propto \rho \cdot l^3 \cdot g \quad (5)$$

$$\text{Fuerzas de gravedad} \propto \mu \cdot l \cdot V \quad (6)$$

$$\text{Fuerzas elásticas} \propto \rho \cdot a^2 \cdot l^2 \quad (7)$$

Los siguientes números adimensionales relacionan estas fuerzas y permiten establecer distintos tipos de flujo, como lo son: el número de Reynolds y el número de Mach.

- Número de Reynolds, Re: Representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Escala la difusividad turbulenta y la laminar. En la práctica, sirve para determinar el régimen del flujo. Para Re bajos el flujo será laminar y para valores altos turbulento. Sin embargo, la transición de laminar a turbulento depende enormemente del problema.

$$Re = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosidad}} = \frac{\rho \cdot V \cdot l}{\mu} \quad (8)$$

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar. La transición de laminar a turbulento ocurre normalmente para valores de número de Reynolds entre medio millón y 10 millones y se producirá antes o después dependiendo en gran medida de la rugosidad de la superficie, de la turbulencia de la corriente libre de aire y de la distribución de presiones.

Mediante la balanza aerodinámica se puede observar el comportamiento del modelo de estudio para distintos números de Reynolds, es decir, para distintos tipos de flujo, laminar o turbulento.

- Número de Mach, M: Se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Nos sirve para diferenciar el flujo compresible del incompresible.

$$M = \frac{F_{inercia}}{F_{elasticidad}} = \frac{V}{a} \quad (9)$$

Según el número de Mach se clasifican las velocidades de vuelo. Para un número de Mach menor de 0.8 el modelo se encuentra a una velocidad de vuelo subsónica. Para un número de Mach entre 0.8 y 1.2 el modelo se encuentra en régimen transónico. Para un número de Mach entre 1.2 y 5 el modelo se encuentra en régimen supersónico. Por último, para un número de Mach superior a 5 el modelo se encuentra en un régimen de vuelo hipersónico.

Mediante la balanza aerodinámica se puede observar el comportamiento de estudio del modelo para diferentes regímenes de vuelo. Para la capacidad del túnel de viento disponible en el Departamento de máquinas y motores térmicos se centrará el estudio en el régimen subsónico.

C. Análisis Dimensional.

Los números adimensionales ayudan a la comprensión de los fenómenos de flujo de fluidos, hacen posible el estudio de la mecánica de fluidos mediante datos experimentales. Posibilitan el estudio de fenómenos a mayor escala mediante semejanza geométrica.

D. Modelo, Prototipo, Dimensiones y Unidades.

Los modelos son formas de representación de objetos, fenómenos, situaciones, entre otras. Existen modelos matemáticos, conceptuales, gráficos, etc., los cuales permiten entender de mejor manera los conceptos a los que hagan referencia.

Los prototipos son objetos fabricados por el ser humano, que deben sus características a los modelos de los cuales parten inicialmente. Los prototipos aerodinámicos permiten entender cuál sería el comportamiento real de los diseños respecto a fenómenos asociados a flujos de aire.

Las dimensiones que se aplican a la mecánica son la masa, la longitud y el tiempo. Cualquier cuerpo que se trabaje dentro de las leyes de la mecánica posee tres dimensiones.

Las unidades con las que se debe trabajar son las del Sistema Internacional. Las unidades básicas que se emplearán y a partir de las cuales se derivan el resto son para la longitud el metro (m), para la masa los kilogramos

(kg), para el tiempo los segundos (s). Ejemplos de unidades derivadas son la fuerza que se mide en Newton (N), la densidad que se mide en kilogramos por metro cúbico ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), etc...

E. Teoría de la Semejanza.

Se emplea para el trabajo con modelos a escala en túneles aerodinámicos con el objetivo de que el comportamiento de los mismos sea lo más cercano posible a como se comportaría en una situación real el objeto en cuestión y poder extrapolar resultados.

- **Semejanza geométrica**

El modelo debe tener la misma forma física que el prototipo, pero se puede escalar con un factor de escala constante. Para que exista este tipo de semejanza la relación entre las dimensiones correspondientes entre el modelo y el prototipo han de ser las mismas.

$$\frac{L_{\text{modelo}}}{L_{\text{prototipo}}} = L_{\text{relativo}} \quad (10)$$

- **Semejanza cinemática**

Para que exista este tipo de semejanza entre el modelo y el prototipo la velocidad del flujo en cualquier punto del modelo, debe ser proporcional en magnitud, dirección y sentido a la velocidad en ese mismo punto del prototipo. La semejanza geométrica es un requisito para la semejanza cinemática. El patrón de las líneas de corriente en modelo y prototipo deben ser una copia exacta a escala geométrica, cuando se tiene semejanza geométrica.

$$\frac{V_{\text{modelo}}}{V_{\text{prototipo}}} = V_{\text{relativo}} \quad (11)$$

- **Semejanza dinámica**

La fuerza en el flujo en cualquier punto del modelo, debe ser proporcional en magnitud, dirección y sentido a la fuerza en ese mismo punto del prototipo. La semejanza cinemática es un requisito para la semejanza dinámica.

$$F_{\text{relativo}} = \frac{F_{\text{modelo}}}{F_{\text{prototipo}}} = \frac{m_m \cdot a_m}{m_{pr} \cdot a_{pr}} = \frac{\rho_m \cdot l_m^3}{\rho_{pr} \cdot l_{pr}^3} \cdot \frac{l_r}{T_r^2} = \rho_r \cdot l_r^2 \cdot \left(\frac{l_r}{T_r}\right)^2 \quad (12)$$

$$F_r = \rho_r \cdot l_r^2 \cdot V_r^2 = \rho_r \cdot A_r^2 \cdot V_r^2 \quad (13)$$

La ecuación 13 se conoce como ley general de la semejanza dinámica entre modelo y prototipo.

Para que exista este tipo de semejanza entre el modelo y el prototipo el número de Reynolds y el número de Mach han de ser el mismo, por tanto:

$$Re_{\text{modelo}} = Re_{\text{prototipo}} \Rightarrow \frac{\rho_m \cdot V_m \cdot L_m}{\mu_m} = \frac{\rho_{pr} \cdot V_{pr} \cdot L_{pr}}{\mu_{pr}} \quad (14)$$

$$M_{\text{modelo}} = M_{\text{prototipo}} \quad (15)$$

Para garantizar la semejanza completa deben existir las tres similitudes entre el modelo y el prototipo. En estas condiciones todos los coeficientes aerodinámicos similares son iguales. Si modificamos los criterios de similitud, variarán, naturalmente, los coeficientes aerodinámicos. En otras palabras, los coeficientes aerodinámicos son funciones de criterios adimensionales de similitud.

Las relaciones entre los coeficientes aerodinámicos y los criterios de semejanza geométrica, cinemática, y dinámica se llaman características aerodinámicas de los cuerpos.

F. Teorema de Pi Buckingham.

Fue propuesto por Edgar Buckingham en 1914. El método sirve para generar los parámetros adimensionales que definen un problema. A estos términos se les denomina monomios pi (Π), ya que son un producto de potencias de las magnitudes que definen el problema.

El método consta de 6 pasos que hay que seguir para hallar dichos términos pi.

- 1) Hacer una lista de los n parámetros que definen el problema, parámetro dependiente y parámetros independientes. Si se omite alguna variable, el análisis dimensional no será completo. Hay que verificar que los parámetros independientes son realmente independientes.
- 2) Determinar un sistema de dimensiones primarias, por ejemplo masa, longitud y tiempo. Hacer una lista con las dimensiones primarias para cada uno de los n parámetros.

- 3) Determinar el número de parámetros adimensionales (k) que definen el problema. Según el teorema de Pi de Buckingham:

$$k = n - j \quad (16)$$

Donde n es el número de parámetros que definen el problema y j es el número de dimensiones primarias que aparecen en el problema.

Si en los siguientes pasos existiera algún problema en el análisis adimensional y n se pudieran encontrar los k parámetros adimensionales, reducir j en una unidad y volver a empezar.

- 4) Seleccionar un grupo de j parámetros, siguiendo los siguientes criterios:
- No escoger el parámetro dependiente, para que solo aparezca en un número adimensional.
 - Los parámetros elegidos no deben ser susceptibles de formar entre ellos un grupo adimensional.
 - Estos parámetros deben representar todas las dimensiones primarias del problema.
 - No escoger parámetros que sean adimensionales. Estos ya son un número Π_i en si mismos.
 - No escoger parámetros que contengan las mismas dimensiones o que difieran en los exponentes.
 - Si es posible, elegir constantes dimensionales en lugar de variables dimensionales.
 - A ser posible escoger parámetros comunes y no parámetros específicos del problema.
 - A ser posible, escoger parámetros simples, es decir, con pocas dimensiones.
- 5) Añadir un parámetro adicional a los j parámetros seleccionados en el apartado anterior. Generar un número Π adimensional con el producto de estos parámetros y determinar algebraicamente los exponentes que hacen al producto adimensional. Repetir este paso k veces para obtener los k números Π adimensionales.
- 6) Escribir la función adimensional resultante y comprobar que todos los números Π adimensionales son realmente adimensionales.

En el análisis dimensional se tiene un término Π_i dependiente (Π_1) y varios términos Π_i independientes ($\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_k$):

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_k) \quad (17)$$

Para garantizar la semejanza completa el modelo se ha de garantizar que los términos Π_i independientes de modelo ($\Pi_{x,m}$) y prototipo ($\Pi_{x,pr}$) son iguales, con lo cual el término Π_i dependiente, también será igual.

XI. Túnel de Viento.

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

Las partes más comunes de un túnel de viento son:

- Ventilador: Produce la corriente de aire del circuito en el que se desarrolla la circulación de aire. Debe ser la velocidad adecuada para que la medición sea exacta.
- Difusor: Disminuye la velocidad del flujo aumentando la presión para disminuir las pérdidas por fricción.
- Cámara de Laminarización: Usa paneles de nido de abeja y mallas finas que deben reducir las fluctuaciones de velocidad del aire.
- Contracción: Aumenta la velocidad del aire y concentra el flujo en la entrada de la sección de ensayos.
- Cámara de ensayos: Aquí colocamos los modelos y todos los instrumentos necesarios para realizar las mediciones.

Existen básicamente dos tipos de túneles de viento, circuito abierto y cerrado, y dos configuraciones para la cámara de ensayos, sección abierta y cerrada.

• Túnel de circuito cerrado

Los túneles cerrados obligan a la corriente a hacer giros sin aumentar considerablemente las pérdidas ni las perturbaciones en la corriente. Por medio de un difusor recuperan su energía fluida, antes de llegar de nuevo a la zona donde se encuentra instalado el difusor.

Como ventajas podemos destacar que a través del uso de esquinas y mallas, la calidad del flujo se puede controlar y es independiente de otras actividades dentro del edificio y condiciones climáticas. Además, requiere menos energía para un tamaño definido de la cámara de ensayos. Por último produce una menor cantidad de ruido cuando se encuentra en funcionamiento.

Como desventajas podemos destacar el coste de construcción, debido al tamaño y el número de elementos constructivos que requiere. Otra desventaja es que sufre un calentamiento del flujo cuando se somete a largos tiempos de funcionamiento, obligando a incorporar sistemas de refrigeración. Para visualización de flujos, en la que requerimos de humo, se debe implementar un sistema de purgado.

• Túnel de circuito abierto

Se toma aire directamente de la atmósfera y después de hacerlo pasar por la cámara de ensayos se devuelve nuevamente a la atmósfera. En este caso, el flujo que sale no recircula directamente por el túnel. Existen túneles abiertos tipo soplador, donde son impulsados por un ventilador centrífugo, y tipo succión donde se emplea un ventilador axial.

Como ventaja principal a resaltar es que este tipo de túneles tiene un menor coste de construcción que el tipo de túnel cerrado.

Entre las desventajas la más reseñable es que para un tamaño dado y una velocidad definida el túnel de viento abierto requiere de mayor energía para funcionar que el túnel de circuito cerrado. Además, cuando se encuentra en funcionamiento suele generar mucho ruido.

En la Figura 14 podemos visualizar de forma gráfica las diferencias entre el túnel de circuito abierto y cerrado.

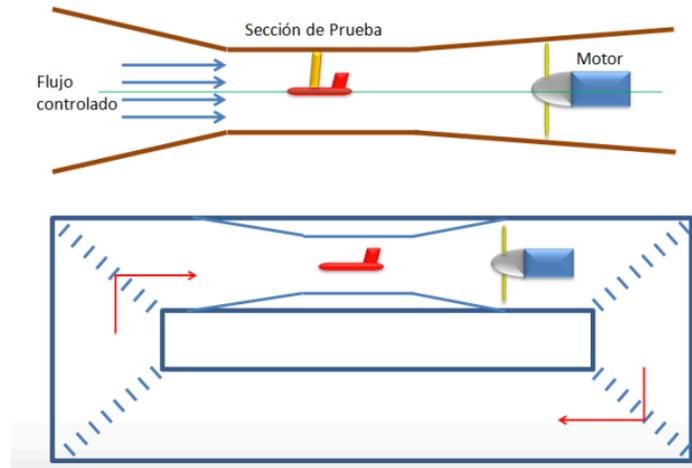


Figura 14 Tipos de circuito de túnel

- **Túnel de sección abierta**

La sección no está confinada por paredes. En la Figura 15 se puede ver un ejemplo.

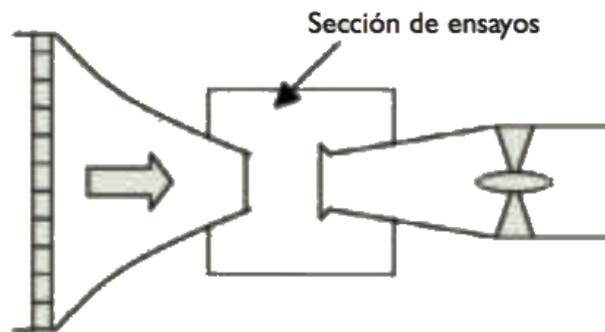


Figura 15 Túnel sección abierta

- **Túnel de sección cerrada**

La sección está limitada por paredes que forman parte del túnel. Este es el tipo de sección que posee el túnel de viento del que dispone el Departamento del CMT. En la Figura 16 se puede ver un ejemplo.

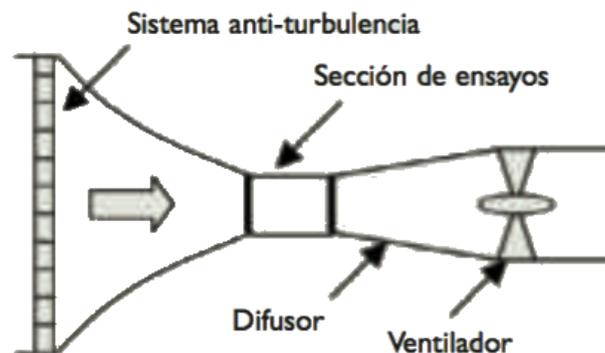


Figura 16 Túnel sección cerrada

XII. BALANZA AERODINÁMICA.

Una balanza de túnel de viento es un instrumento que se ocupa de cuantificar las cargas aerodinámicas, fuerzas y momentos que se ejercen sobre un objeto cuando sobre él incide una corriente de aire. Gracias a la balanza aerodinámica podemos estudiar el comportamiento de cualquier modelo ante un flujo de aire.

La medición de las cargas aerodinámicas nos proporciona la suficiente información para predecir el comportamiento real que tendría el modelo en su escala real en condiciones semejantes a las que se somete el túnel. Para hacer una analogía adecuada se debe tener tanto en el modelo como en el prototipo un mismo número de Reynolds.

Gracias a la semejanza entre el modelo y el prototipo a escala real se pueden predecir el comportamiento real y de este modo evitar situaciones de peligro en ciertas condiciones de funcionamiento, por ejemplo en una aeronave se sabrá la velocidad máxima que puede alcanzar sin comenzar el bataneo, el ángulo de ataque al que entra en pérdida, etc... Otro aspecto importantes, en el campo de la aeronáutica, por ejemplo, es comprobar si realmente nuestro perfil en cuestión es posible y óptimo o no, con lo que verificar esto antes de fabricarlo a escala real nos puede ahorrar grandes costes.

Como ya se introdujo anteriormente, una balanza aerodinámica bien diseñada dispondrá de una alta sensibilidad, linealidad y repetitividad, baja histéresis, baja interacción de los componentes y por último baja sensibilidad a la temperatura.

Existen dos grandes grupos de balanzas, balanzas externas e internas.

A. Balanzas externas.

Ubicadas fuera del modelo y dentro de la cámara de pruebas. La fuerza aerodinámica total y momentos son separados con la ayuda de varios sistemas mecánicos. El modelo es instalado en la cámara de pruebas del túnel con la ayuda de soportes que lo vinculan a la balanza. Las componentes de fuerza y momentos son usualmente determinados en un sistema de ejes “balanza” paralelo al sistema de ejes viento del túnel. El diseño de una balanza externa incluye la incorporación de un dispositivo que cambie la actitud del modelo.

Las ventajas de este tipo de balanzas es que pueden utilizarse para multitud de estudios utilizando distintos modelos, cambiando quizá solo el tipo y número de soporte de la pieza de estudio. Además al encontrarse fuera del modelo de estudio, en caso de reparación o modificación, resulta más fácil a priori trabajar sobre ella.

Las desventajas de este tipo de balanzas es que en la mayoría de los casos, en mayor o menor medida, estas interfieren en el estudio al desviar el flujo de aire en el espacio que ocupa. Además otra de las desventajas es el comparativamente elevado peso de sus elementos, debido a la inercia de los sistemas de medición tales balanzas no pueden ser usadas en túneles de tamaños pequeños.

Podemos destacar los siguientes tipos de balanzas externas:

- **Balanza de alambre**

La balanza de alambre fue uno de los primeros tipos de balanza utilizadas en un túnel de viento. Este tipo de balanza consistía en colgar el modelo de estudio de forma inversa sobre unos cables y mediante la determinación de la tensión generada en los cables se determinaba la sustentación y la resistencia generada en el modelo.

Como inconveniente este tipo de modelo tiene el problema de que debido al peso del modelo y la sustentación aerodinámica la tensión de los cables nunca puede llegar a ser cero, es decir, no podemos medir el ángulo de ataque al que deja de sustentar. Otro inconveniente es el arrastre generado por los cables que es difícil de medir. Además de esto, como es obvio, los cables tienden a romperse, lo que podría llevar a la pérdida del modelo, resultando ser este tipo de balanza menos robusta y versátil que otros tipos de balanzas externas. Por estos motivos, este tipo de balanzas no son ampliamente empleadas hoy día.

En la Figura 17 podemos observar sistema que conforma una balanza de alambre.

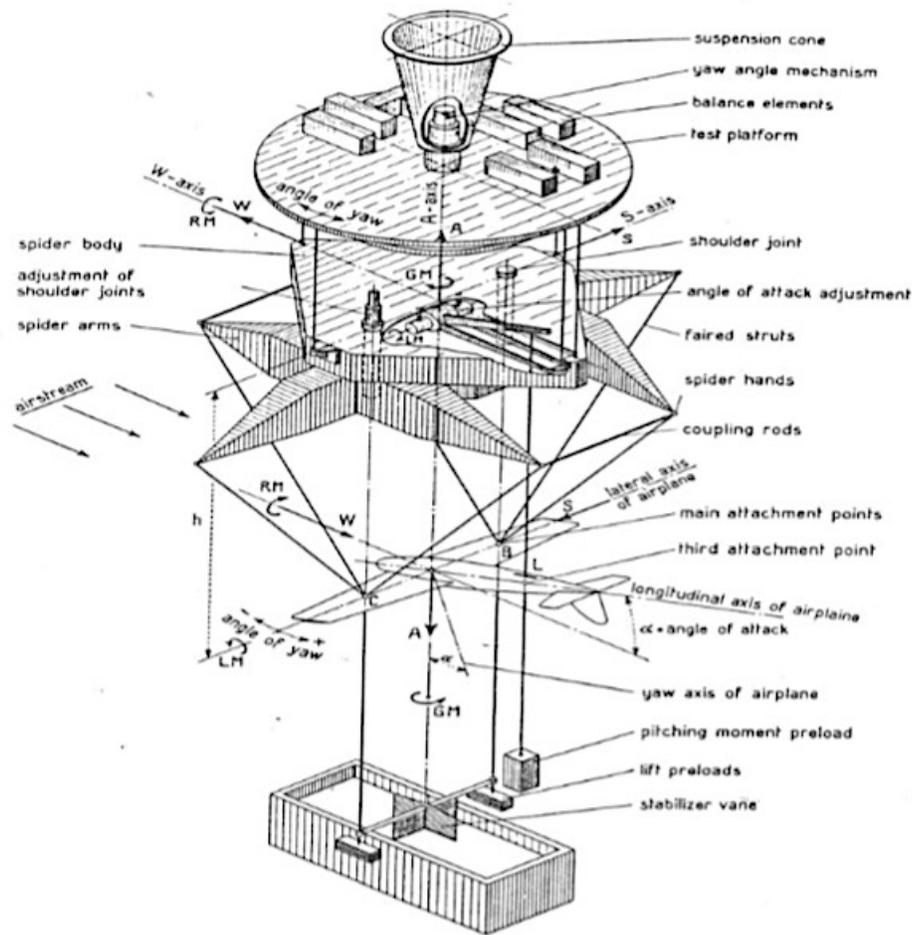


Figura 17 Balanza de Alambre

Hoy en día, la mayoría de las balanzas externas proporcionan un montaje puntual para cada tipo de modelo, esto se consigue mediante mecanismos que nos permitan cambiar el ángulo de ataque y la guiñada; Además, se transmiten las cargas del modelo mediante un sistema de galgas que nos separa las fuerzas en componentes y a partir de estos también podemos obtener cada uno de los momentos que se generan.

Estos tres tipos de balanzas se basan siempre en dos soportes delanteros y un soporte trasero en la cola. Estos soportes o columnas conectan el modelo con el sistema de medición.

De acuerdo a como separan las componentes de fuerza y de momento y de acuerdo con la manera en que el sistema principal está montado se dividen en las balanzas tipo plataforma, yugo y piramidal.

• Balanza de plataforma

Este tipo de balanza utiliza tres o cuatro columnas para soportar el modelo sobre una placa de distribución. Las balanzas de plataforma son las más empleadas en el ámbito de la aeronáutica para los túneles de viento.

Las ventajas más reseñables son las siguientes:

- Versatilidad y robustez.
- Pueden ser construidos y dispuestos de manera fácil y sencilla.

Las desventajas más reseñables son las siguientes:

- Los momentos de balanceo y guiñada aparecen como pequeñas diferencias entre grandes fuerzas.
- El centro de resolución de la balanza no está sobre el modelo, por lo que el momento de cabeceo debe ser transferido del centro de la plataforma al centro de giro del modelo.
- La fuerza de resistencia produce un falso momento de cabeceo sobre las células de carga, así como la carga lateral produce un falso momento de balanceo. Estas iteraciones deben ser restadas de las mediciones.

Estos inconvenientes deben ser minimizados al máximo para obtener los valores finales fiables. Hoy en día, gracias a los nuevos sistemas de adquisición de datos las desventajas se han reducido en gran medida.

En la Figura 18 podemos observar un ejemplo de balanza de plataforma, en la cual las fuerzas y momentos se obtienen del siguiente modo:

$$\text{Sustentación} = -(a + b + c) \quad (18)$$

$$\text{Resistencia} = d + e \quad (19)$$

$$\text{Fuerza lateral} = -f \quad (20)$$

$$\text{Momento de cabeceo} = c \cdot x \quad (21)$$

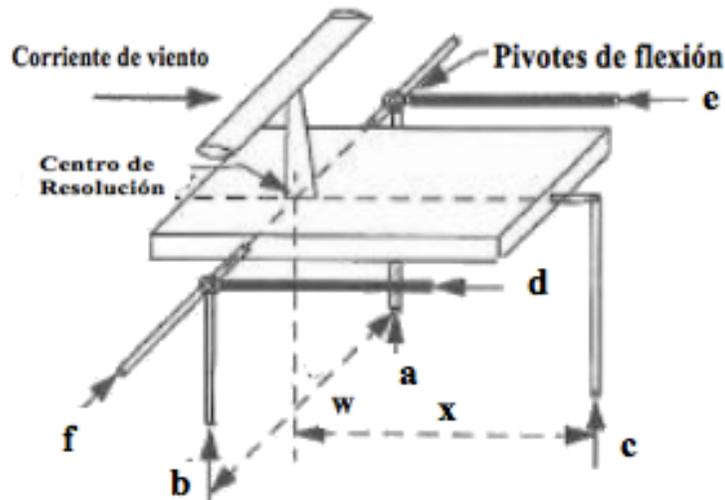


Figura 18 Balanza de Alambre

- **Balanza de yugo**

Este tipo de balanzas ofrece una ventaja sobre balanza de plataforma y es que los momentos son leídos respecto del modelo, ya que el centro de resolución está sobre la maqueta. Sin embargo, en este tipo de balanzas produce mayores deformaciones, particularmente en los momentos de cabeceo y en la fuerza lateral.

Dado que la estructura de la balanza debe superar el ancho de la cámara de ensayos a fin de que los brazos superiores para la resistencia aerodinámica queden en posición apropiada, resulta un brazo de palanca para la guiñada excepcionalmente largo. Los altos pilares de soportes están sujetos a grandes deflexiones.

En la Figura 19 podemos observar un ejemplo de balanza de yugo o horquilla, en la cual las fuerzas y momentos se obtienen del siguiente modo:

$$\text{Sustentación} = (a + b) \quad (22)$$

$$\text{Resistencia} = c + d + e \quad (23)$$

$$\text{Fuerza lateral} = f \quad (24)$$

$$\text{Momento de cabeceo} = -e \cdot x \quad (25)$$

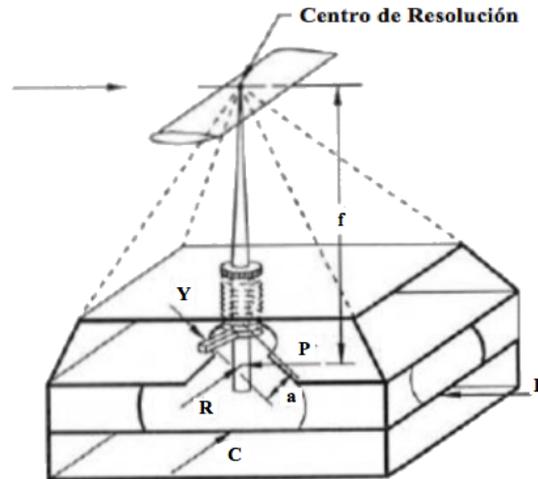


Figura 20 Balanza piramidal

A pesar de los diferentes tipos de balanzas externas, existen algunos elementos que las conforman que son comunes a la mayoría. Las cuales son:

- Soporte para el modelo: Su objetivo principal es sostener y posicionar adecuadamente el modelo en la cámara de toma de medidas. Debe ser rígido, no interferir mucho en el flujo que pasa por el modelo, dar facilidades a la hora de montar y desmontar el modelo y por último dar la posibilidad de que el modelo pueda variar su ángulo de ataque.
- Plataforma para mantener el soporte y para obtener las fuerzas actuantes sobre el modelo.
- Galgas extensiométricas entre el sistema y puntos vinculados a la bancada fija.
- Sistema mecánico para separar mecánicamente las componentes de las fuerzas transferidas a la plataforma flotante.
- Un mecanismo que sea capaz de cambiar el ángulo de ataque del modelo.

B. Balanzas internas.

Ubicadas en el interior del modelo o sus soportes. Las balanzas internas fueron desarrolladas debido a la necesidad de excluir las fuerzas actuando sobre soportes. A velocidades supersónicas el flujo alrededor del modelo es menos afectado por los soportes en la forma de voladizo. En las balanzas internas, se opta por instalar entre la unión del modelo al soporte o en el mismo soporte.

Cuando la balanza es instalada dentro del modelo, solo las fuerzas actuantes sobre el modelo son medidas y el soporte solo causa perturbaciones en el flujo en la cola del modelo. Cuando la balanza es instalada en el soporte mismo, está es protegida del flujo por un carenado cilíndrico, cónico o en forma de perfil alar.

La ventaja de este tipo de balanzas es que no interfiere de ninguna forma en el flujo de aire, pudiendo realizar así un estudio más preciso que utilizando el tipo anterior de balanzas.

Las desventajas de este tipo son que solo sirven para un solo modelo de estudio, y su complejidad y coste le hacen prohibitiva para la mayoría de estudio.

Un ejemplo de este tipo de balanza es el que se observa en la Figura 21.

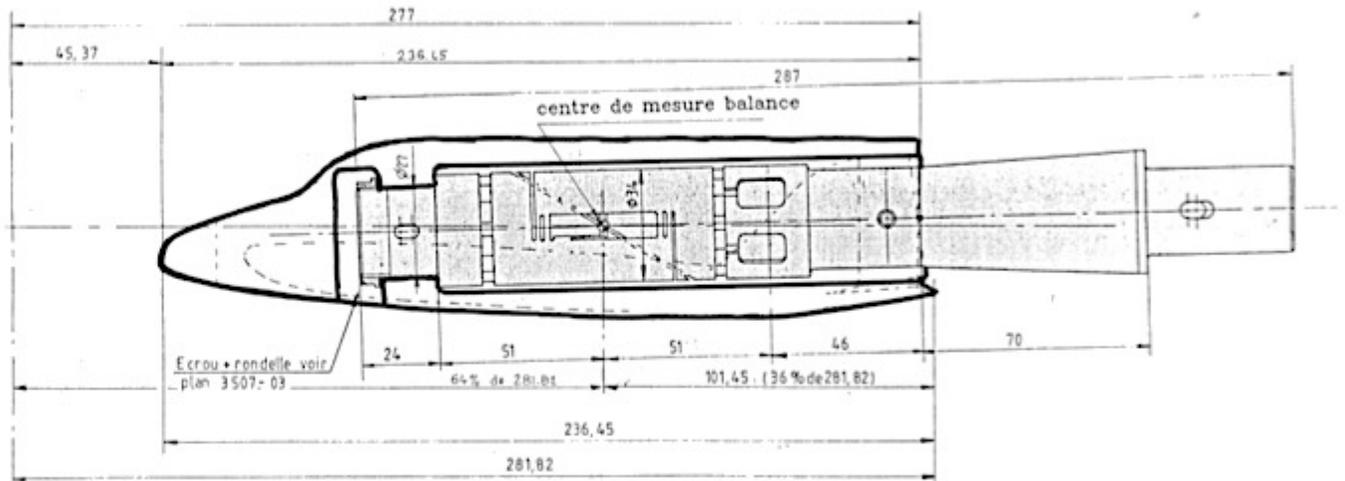


Figura 21 Balanza interna

XIII. DIAGNÓSTICO DEL EQUIPO ORIGINAL.

A. Funcionamiento, componentes y accesorios.

La balanza disponible en el túnel de viento del laboratorio de Aerodinámica II del Departamento de Motores y Máquinas Térmicas se trata de una balanza extensiométrica con la pretensión de medir las fuerzas normal, tangencial y momento de cabeceo. Está compuesta por células de carga, las cuales contienen galgas extensiométricas.

La balanza que se adquirió para realizar ciertos ensayos en el túnel de viento es el modelo KineOptics WTB 2.0, bastante obsoleto actualmente y con una dificultosa localización de piezas de sustitución, por no decir prácticamente imposible. La balanza es utilizada para la medición de las fuerzas aerodinámicas elementales que actúan sobre un perfil en el interior del túnel de viento.

La balanza está compuesta por tres células de carga, las cuales son de la marca Honeywell, modelo 31. Son células de carga en miniatura que son capaces de trabajar tanto a tracción como a compresión. Cada célula de carga mide la fuerza producida sobre su eje longitudinal. La medición de cada fuerza depende de la configuración. En el caso de la balanza actual, la configuración existente es la de pórtico la cual es capaz de medir las fuerzas de sustentación y resistencia y el momento de cabeceo como diferencia de fuerzas entre las dos galgas extensiométricas dispuestas verticalmente. En la Figura 22 se puede observar una imagen del equipo de medida actual.

Las dos células de carga que se encuentran verticales tienen un límite máximo de 45.36 kg, mientras que la célula de carga dispuesta horizontalmente tiene un límite máximo de 11.34 kg.

La visualización de las mediciones efectuadas por la balanza se realiza mediante un sistema de adquisición de datos que transforman la tensión eléctrica transmitida por las galgas extensiométricas en fuerza mediante rectas de ajuste realizadas previamente. Cada visualizador del sistema de adquisición de datos muestra la señal de cada galga. En la Figura 23 se puede ver una imagen del equipo en cuestión.

La balanza debe ser calibrada con precisión y con cierta periodicidad debido a que de ella se obtiene la relación entre las cargas aplicadas sobre la balanza y la señal de salida de las células de carga, la cual se expresa mediante una matriz de calibración de tres componentes.

El método de calibración consiste en la utilización de unas pesas colgadas de la balanza por medio de unas cuerdas ligeras y resistentes alrededor de unas poleas de baja fricción. En teoría esta calibración ha de realizarse previamente a cada ensayo, en la práctica esta calibración se realiza una vez al año para todos los ensayos anuales.

En teoría, el diseño de la balanza reduce los acoplamientos entre ejes. Las causas típicas de este efecto durante el calibrado son un mal alineamiento de las poleas con la estructura, una mala elección del lugar de enganche de las pesas o un incorrecto asentamiento de la balanza, de modo que no se encuentre en vertical u horizontal.

En conclusión, una correcta calibración determina la fiabilidad del resultado del estudio, de modo que será esto lo que determine la estructura donde irá colocada la balanza y la configuración para realizar el calibrado.

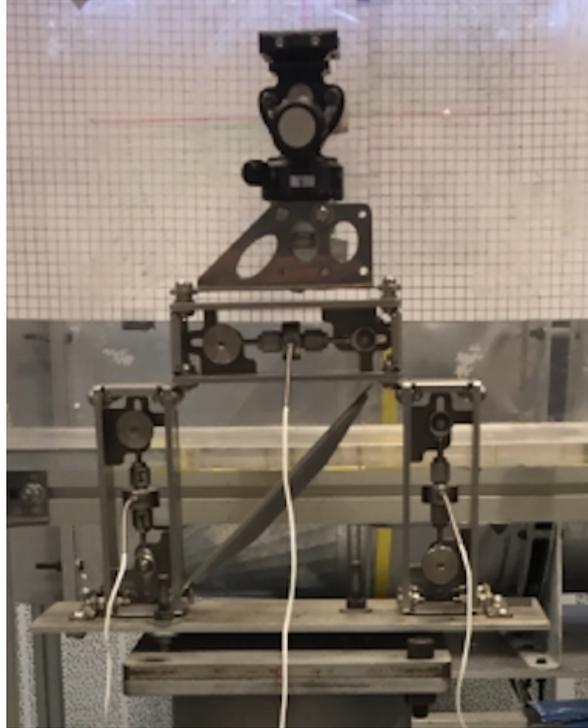


Figura 22 Balanza actual



Figura 23 Equipo adquisición datos actual

B. Mantenimiento del equipo.

No existe a día hoy un historial de mantenimiento de la balanza actual y tampoco fichas técnicas de la balanza adquirida. Por este motivo es difícil la adquisición de piezas de repuesto y correcto seguimiento del mantenimiento. Sí existe constancia de una serie de cambio de tornillos y tuercas oxidadas en el año 2004 por una serie de comentarios de uno de los jefes de mantenimiento de los laboratorios de Departamento de máquinas y motores térmicos, pero no existe constancia escrita en ningún informe.

C. Observaciones generales del equipo.

Se puede resaltar la falta de información con respecto al equipo de medida disponible actualmente lo cual dificulta imperiosamente tanto su mantenimiento como su correcto funcionamiento. Además, su principal problema y déficit es que solo es capaz de medir tres o dos componentes de las seis posibles dependiendo de la configuración en la que se encuentre.

XIV. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.

- **Puesta a punto equipo actual.**

Esta alternativa de solución consiste en que, una vez se haya realizado el diagnóstico del equipo actual, plantear las posibles reparaciones o sustituciones de elementos que no se encuentren en un estado idóneo y llevarlas a cabo por orden de prioridad, con el fin último de disponer de un funcionamiento adecuado del equipo disponible actualmente.

- **Diseño de equipo simple.**

Esta alternativa de solución consiste en diseñar un nuevo equipo capaz de medir las fuerzas aerodinámicas básicas de sustentación y resistencia en prototipos aerodinámicos. Aplicando esta solución se podrán sentar las bases de futuros proyectos y realizar análisis rápidos y precisos de lo que se desea medir. Las ventajas de esta solución son el bajo coste del proyecto y el simple diseño. La principal desventaja es que esta alternativa debe ser una solución a corto plazo, ya que para futuros proyectos más complejos se requiere de una balanza capaz de medir un mayor número de componentes.

- **Diseño de equipo completo.**

Esta alternativa de solución consiste en diseñar un nuevo equipo capaz de medir las máximas componentes de fuerzas y momentos aerodinámicos en prototipos para túnel de viento. Aplicando esta solución se podrán realizar análisis completos y precisos de lo que se desea medir. Las ventajas de esta solución son la capacidad de medir un mayor número de componentes y su empleabilidad a largo plazo. Las principales desventajas son el elevado coste del proyecto, el diseño y adaptación al túnel de viento actual.

A. Selección de la alternativa.

De las alternativas de solución planteadas y del diagnóstico general del equipo del que dispone el Departamento se selecciona como alternativa idónea y con mayores prestaciones a largo plazo la tercera opción. La tercera alternativa ofrece una mejora sustancial de análisis y unas mayores prestaciones para el laboratorio. Además nos permite el desarrollo de una balanza adaptable para todo tipo de ensayos y prácticas que se deseen plantear.

XV. PROPUESTA DE MEJORA (DISEÑO DE SISTEMA DE MEDICIÓN).

A. Especificaciones técnicas.

La balanza del túnel de viento debe cumplir con los criterios de metrología como cualquier otro instrumento de medida. Además, se deben tener en cuenta otro tipo de restricciones como son el modo de fabricación, el coste de logística, la compra de las piezas existentes en el mercado de partes del equipo a diseñar y la fabricación de las piezas requeridas, también se ha de tener en cuenta la necesidad de adaptación al túnel de viento existente (funcionalidad) y la ergonomía. En resumen los criterios básicos son, como se viene remarcado a lo largo del texto: la alta sensibilidad, la reproducibilidad, baja histéresis, linealidad, costo/beneficio, funcionalidad, fabricación, compra de componentes, ergonomía y montaje.

Los criterios de metrología a cumplir son: La sensibilidad se logra usando elementos que puedan transformar la señal medida a una señal eléctrica, los extensómetros y los transductores de fuerza pueden cumplir con esta tarea. La linealidad y reproductibilidad, las partes que componen la balanza deben formar un conjunto integrado, en el que no existan desplazamientos relativos entre las partes. Por último, para evitar histéresis se deben emplear materiales elásticos con un elevado módulo de Young.

Los criterios de detalles a cumplir son: El diseño de la balanza debe realizarse teniendo en cuenta el espacio disponible en el túnel de viento actual, con esto se conseguirá una buena funcionalidad. La fabricación y montaje son otros factores a tener en cuenta en este criterio de diseño, las uniones deben seleccionarse de tal forma que las piezas en su mayoría sean comerciales y que puedan ser adecuadamente ensambladas por un técnico cualificado.

El criterio de factor de coste/beneficio o también conocido como rentabilidad es posiblemente el factor más determinante y limitante. Este factor nos limita el presupuesto y por el cual se debe optimizar al máximo el diseño de la balanza sin producir sobrecostes. Sin embargo, siempre se aplicará un factor de seguridad para evitar posibles fallos de diseño.

Por último, el parámetro más importante es el número de componentes que desean medir. En este caso de diseño y en sintonía con el objetivo último, se diseñará una balanza aerodinámica de tres componentes de las seis posibles. Las tres componentes medibles serán la fuerza de sustentación, la fuerza de resistencia y el momento de cabeceo.

B. Alternativas de diseño.

Las alternativas de balanza que se pueden plantear son básicamente todos los tipos de balanzas que se han introducido en el apartado de balanzas aerodinámicas. En este subapartado se expondrán sus posibles ventajas y desventajas con respecto al objetivo que se pretende alcanzar.

• Balanza interna.

- Flauta. Este tipo de balanza tiene como ventaja que tiene una correcta adaptabilidad a cualquier tipo de ensayo siempre y cuando se cumplan las condiciones de carga máxima permisible. Como desventajas se presentan que requiere adaptar el modelo a la balanza, posibles deformaciones por excesos de carga y una difícil fabricación y ensamblaje.

• Balanza externa.

- Alambre. Este tipo de balanza tiene como ventajas que permite usar galgas extensiométricas y únicamente requiere en el diseño de dinamómetros. Como desventajas se presentan que los resortes y alambres tienden a romperse y estropean el ensayo, la linealidad no está garantizada y la frecuencia de cambio de resortes supone un coste demasiado asiduo.
- Yugo. Este tipo de balanza tiene como ventaja que los momentos pueden ser leídos directamente respecto al modelo ya que el centro de resolución esta sobre el mismo. Como desventaja se presenta que por sus características se generan grandes deformaciones.
- Plataforma. Este tipo de balanza tiene como ventaja que tiene tres o cuatro apoyos que soportan la estructura principal y su elevada funcionalidad. Como desventaja se presenta que el centro de resolución no se encuentra sobre el modelo por lo que el momento de cabeceo debe transferirse del centro de la plataforma al centro de giro del modelo.

- Piramidal. Este tipo de balanza tiene como ventajas que la medida de los momentos se realiza alrededor del centro de resolución y que las seis componentes se leen independientemente. Como desventajas se presentan elevados costes y una difícil fabricación y ensamblaje.

C. Selección de la balanza.

Después de estudiar cuidadosamente los requisitos del proyecto, la geometría, características del túnel de viento, los posibles pros y contras de cada tipo de balanza y el rango de las fuerzas esperadas, la balanza seleccionada es la de tipo externa de plataforma con algunas modificaciones.

D. Diseño de concepto.

Partiendo del diseño en 2D de un perfil aerodinámico, del que se desea obtener las fuerzas de sustentación y resistencia y el momento de cabeceo se diseña una balanza basada en la instalada en el “Von Karman Institute for Fluid Dynamics”.

Se dispondrá sobre una bancada de ensayo dos placas lo suficientemente rígidas para que no se deformen unidas a la bancada y entre ellas por articulaciones que permitan el desplazamiento solo en la dirección en la que se desea medir.

La placa inferior dispondrá de una galga que sea capaz de medir únicamente fuerzas horizontales. Esta galga estará dispuesta de forma que una la placa inferior con la bancada atornillándose entre ambas. Esta placa solo se podrá desplazar horizontalmente y estará unida a la bancada por cuatro articulaciones en los extremos de la placa que solo permitan este desplazamiento.

Entre la placa inferior y la placa superior (placa de distribución) se colocan tres galgas extensiométricas verticalmente. Estas galgas serán las encargadas de medir la fuerza vertical que genera la placa superior sobre la inferior. La disposición de las galgas es la siguiente: dos de ellas a cada extremo del perfil sobre el eje aerodinámico de perfil para que nos sirvan también para poder medir el alabeo mediante la diferencia de fuerzas entre ambas; la tercera galga la situaremos en la parte posterior de la placa, en el eje simétrico del perfil.

Se debe tener en cuenta que las dos galgas delanteras se situarán atornilladas entre las dos placas y sobre cada una de ellas, sobre la placa superior se situará dos columnas que nos servirán de soporte para el perfil, con la tercera galga sucederá lo mismo, solo que en este caso estará unida a un cilindro actuador que nos permita variar el ángulo de ataque del perfil.

Por último la quinta galga se dispondrá entre el actuador y la placa superior y lo que permitirá medir es el momento de cabeceo de forma individual y no como una pequeña diferencia entre las células de carga dispuestas anteriormente entre las dos placas, evitando los problemas producidos por el cálculo de momentos a partir de pequeñas diferencias de fuerza, y la interferencia con el momento producido por el componente de fuerza horizontal.

Cabe resaltar que la placa superior se moverá horizontalmente solidaria a la placa inferior.

En la Figura 24 se puede observar gráficamente lo mencionado de forma teórica en un plano visto desde el lateral, con lo que una de las células de distribución de los extremos del perfil no se puede visualizar.

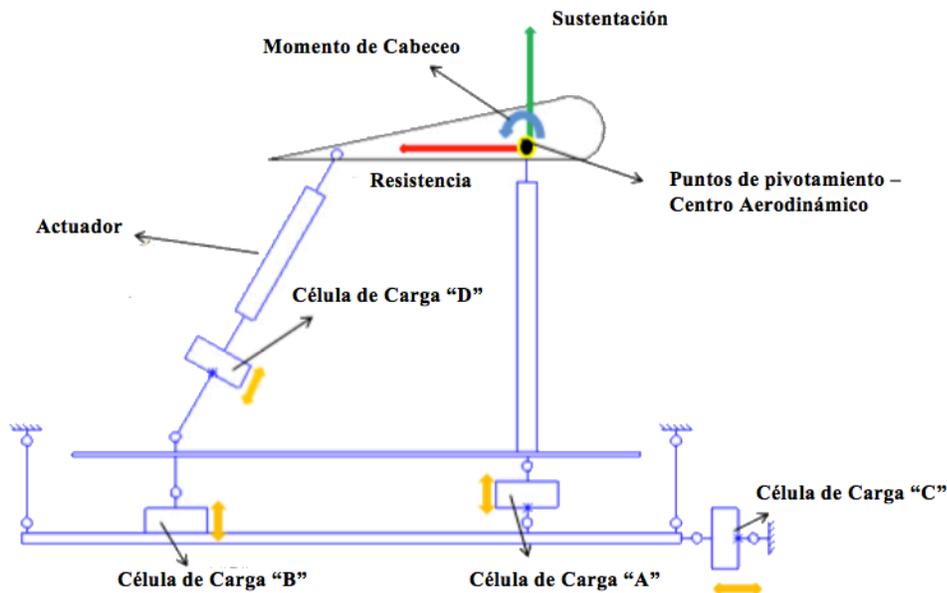


Figura 24 Diseño conceptual - Von Karman Institute for Fluid Dynamics

E. Medición de fuerzas y presiones.

Esta balanza ha de ser diseñada para su utilización en el túnel de viento del laboratorio del CMT y deberá ser capaz de medir las fuerzas de sustentación, resistencia y empuje, así como el momento de cabeceo del modelo aerodinámico.

La balanza de plataforma está formada por dos placas flotantes. La placa superior, llamada placa de distribución, está unida a la bancada fija del túnel de viento por dos articulaciones en uno de los laterales que le permiten el movimiento únicamente en dirección vertical. Esta placa a su vez, está unida rígidamente a una placa inferior que actuará de referencia por medio de tres células de carga, "A1", "A2" y "B", las cuales serán las encargadas de medir las componentes verticales de la fuerza, es decir, la sustentación. Las células de carga "A1" y "A2" son las que se dispone en cada uno de los puntos bajo los que se encuentran las vigas de sujeción para el perfil y la célula de carga "B" se dispondrá en el eje de simetría del perfil en la parte trasera de la placa.

La placa de distribución, además de estar unida por medio de las células de carga mencionadas anteriormente a la placa de distribución, también está unida a la bancada fija del túnel por medio de cuatro articulaciones, una en cada uno de los extremos de la placa, que solo le permite el movimiento horizontalmente. Esta placa inferior está unida también por su lateral delantero por medio de una célula de carga, "C", a la bancada del túnel, con la que se permite la obtención de las componentes horizontales, es decir, la resistencia.

El momento de cabeceo se podría obtener como se hace en las balanzas de plataforma normalmente como diferencia entre las fuerzas existentes entre la célula de carga "B" y la suma de las células de carga "A1" y "A2". Sin embargo, esto supone serios inconvenientes ya que el momento aparece como pequeñas diferencias entre grandes fuerzas, el momento de cabeceo debe ser transferido y el empuje, la resistencia y la fuerza lateral producen momentos de cabeceo y balanceo. Para evitar estos inconvenientes se instala una célula de carga, "D", entre el actuador trasero y la placa de distribución para obtener el momento de cabeceo de forma individual.

Las fuerzas y momentos obtenidos por las células de carga se obtienen del siguiente modo de forma matemática:

$$Sustentación = A1 + A2 + B \quad (32)$$

$$Resistencia = C \quad (33)$$

$$Momento de cabeceo = D \cdot x_{DistD-DistCP} \quad (34)$$

$$Momento de alabeo = A1 \cdot x_1 - A2 \cdot x_2 \quad (35)$$

En la figura 25 se esquematiza en 3D la disposición de todos los elementos del diseño.

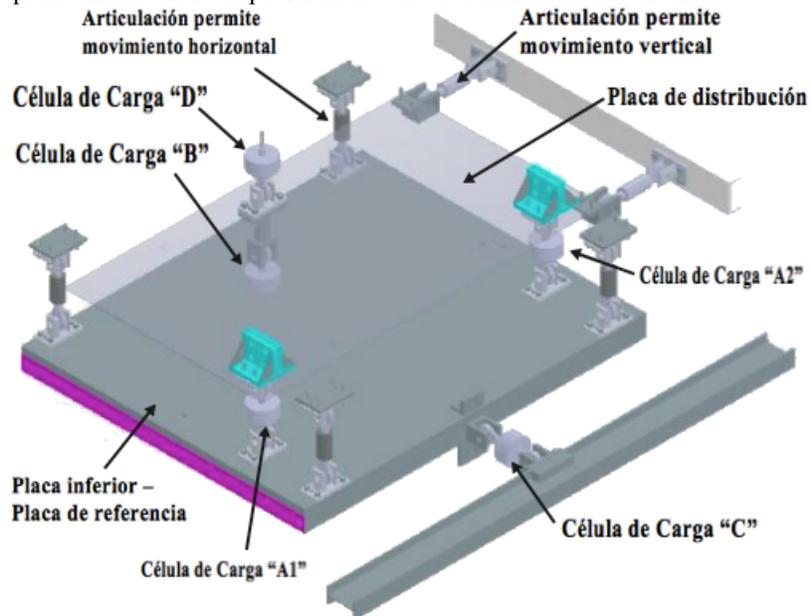


Figura 25 Balanza 3D - Von Karman Institute for Fluid Dynamics

F. Sistemas y componentes.

La balanza de plataforma es una balanza que muestra una gran versatilidad, en el que es posible desarrollar una amplia gama de experimentos con diferentes tipos de modelos simplemente cambiando la configuración del sistema de montaje del modelo.

Por otra parte, este tipo de balanza tiene un inconveniente notable, los momentos aparecen como pequeñas diferencias en las grandes fuerzas, lo que puede ser un inconveniente para calcular con precisión el momento. En este nuevo diseño de la balanza, se ha tratado de resolver este problema sin disminuir la precisión de la balanza.

El diseño mecánico de la balanza se divide en cuatro partes.

- **Sistema de montaje del modelo.**

El montaje del modelo se realizará por tres puntos. Habrá dos vigas delanteras para la sujeción de los extremos del perfil mediante una varilla de acero que pase por su centro aerodinámico. Estas dos vigas se encontrarán externas a la cámara de ensayos y serán de sección rectangular. La sección de estas vigas se ha seleccionado rectangular por su fácil obtención en el mercado y ya que no se necesita de ningún tipo de sección aerodinámica porque no interfieren en el flujo. Una de las vigas delanteras será desmontable para posibilitar el intercambio de tipos de modelos de estudio. El tercer apoyo se encuentra en la parte posterior y está compuesto por un actuador eléctrico, para variar el ángulo de ataque del modelo, y por una célula de carga, la cual es la encargada de obtener el momento de cabeceo. La viga posterior consistirá en una varilla de acero gruesa para evitar deformaciones pero con un compromiso para evitar alteraciones de flujo, aunque estas serán mínimas ya que la varilla se encuentra en la parte posterior.

- **Sistema de medida.**

Como se ha introducido anteriormente, el sistema de medida está formado por tres tipos de elementos, los cuales son la placa de distribución, la placa inferior y las células de carga. Para realizar la sujeción del sistema a puntos fijos de la bancada y posibilitar movimientos relativos entre los elementos se emplean articulaciones que posibilitan el movimiento en la dirección que se desea. Los elementos de estudio definidos de forma más precisa son los siguientes:

- La placa inferior: Esta placa actuará como soporte para las células de carga "A1", "A2", "B" y "C". Las tres primeras se encargarán de medir las fuerzas verticales y la cuarta la fuerza horizontal. Esta placa actuará como referencia para las fuerzas verticales y por tanto debe ser lo más rígida posible para evitar

posibles deformaciones en ella. Para conseguir una elevada rigidez se diseñará en aluminio y lo suficientemente gruesa. Gracias a que se ha empleado aluminio se evitarán posibles oxidaciones y se consigue que la placa sea liviana. Cabe considerar que esta placa solo tendrá posibilitado su movimiento en la dirección horizontal mediante cuatro articulaciones sujetas a la bancada para conseguir obtener mediante la célula de carga “C” la fuerza de resistencia y poder seguir siendo referencia para la obtención de las fuerzas verticales.

- La paca de distribución: La placa de distribución mantiene las células de carga verticales en la posición correcta entre la placa inferior y ella misma. Esta placa se le permite el movimiento verticalmente por medio de dos articulaciones fijas a la bancada y se mueve horizontalmente solidaria a la placa inferior. Esta placa se fabrica de la misma forma que la placa inferior y también con aluminio para conseguir una elevada rigidez, ya que esta placa sirve como base de la estructura de montaje del modelo. Esta placa sirve de referencia para la célula de carga “D”.
- Células de carga: Las células son transductores que convierten la fuerza aplicada sobre ellas en una señal eléctrica medible, este tipo de células de carga se denominan extensiométricas. Los propios medidores están unidos a las placas que tienden a comprimirlo o traicionarlos según la dirección la fuerza que se le aplique. Cuando se aplica una fuerza al modelo, este, por medio de las vigas y las placas genera una tensión a las células de carga. Esa tensión varía la resistencia eléctrica de las células de carga en proporción a la fuerza.

La balanza ha de diseñar, es una balanza de tres componentes en la cuál se colocan cinco células de carga. Las tres células de carga que unen la placa inferior y la placa de distribución “A1”, “A2” y “B” miden las fuerzas verticales y se colocan justo debajo de las vigas verticales y el sistema trasero de montaje, la célula de carga “C” mide la fuerza horizontal y su posición coincide con la proyección del eje longitudinal de la placa inferior y por último, la célula de carga “D” mide el momento de cabeceo de forma independiente y se dispone entre la placa de distribución y el actuador trasero.

Todas las células de carga son de tipo compresión/tensión en subminiatura de 19 mm de diámetro. La carga máxima deseada para estudios fiables en el túnel de viento es de 120 N con una resolución de 1 N con una precisión mínima del 1% y un rango de temperaturas de funcionamiento entre 16° y 40°.

Las limitaciones que presentan las galgas extensiométricas son las siguientes:

- 1) El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuerza del margen eléctrico.
- 2) Se necesita una buena adhesión al objeto para que la medida de la deformación sea correcta.
- 3) Un incremento en la temperatura tiene como consecuencias una variación de la resistencia aún sin aplicar ningún esfuerzo.
- 4) El coeficiente de dilatación de la galga debe ser parecido al del soporte para evitar tensiones mecánicas.
- 5) Presenta fenómenos de autocalentamiento debido a la disipación de potencia de alimentación.

Las ventajas que ofrecen las galgas y por lo que son ampliamente empleadas son:

- 1) Se tratan de dispositivos de tamaño reducido y ligeros.
- 2) Pueden ser alimentados con corriente continua o corriente alterna.
- 3) Tienen una buena respuesta en frecuencia.
- 4) Pueden emplearse para mediciones estáticas y dinámicas.
- 5) No son afectados por los campos magnéticos.
- 6) Los sistemas de medición presentan muy buena linealidad, proporcionando de este modo resultados de medida fiables.

• Estructura.

La estructura que se empleará será básicamente la existente actualmente al túnel de viento que sirve de sujeción para la cámara de ensayos cerrada del túnel de viento de circuito cerrado del Departamento de máquinas y motores térmicos. Se añadirán 4 vigas de sección rectangular y del mismo tipo que las que existen actualmente en la bancada.

La estructura tiene las siguientes cuatro funciones:

- Actúa como soporte y referencia para la célula de carga “C”.
- Mantiene el sistema de medida fijo al suelo.
- Transmite las fuerzas al suelo del túnel, evitando deformaciones estructurales.
- Actúa como referencia al suelo de la sección de ensayo.

La estructura está diseñada con perfiles tipo “Fasten” de aluminio pesado con sección cuadrada 60 x 60 mm, este tipo de vigas tienen una alta rigidez y bajas deformaciones, además de evitar posibles oxidaciones. Los perfiles

empleados poseen a rieles los cuales se anclan los tornillos. El tipo de sección puede ser visualizado en la Figura 26. La estructura está anclada al suelo mediante cuatro puntos para evitar cualquier desplazamiento de la bancada sobre el suelo durante los ensayos.

Perfil pesado 60x60 Strong profile 60x60

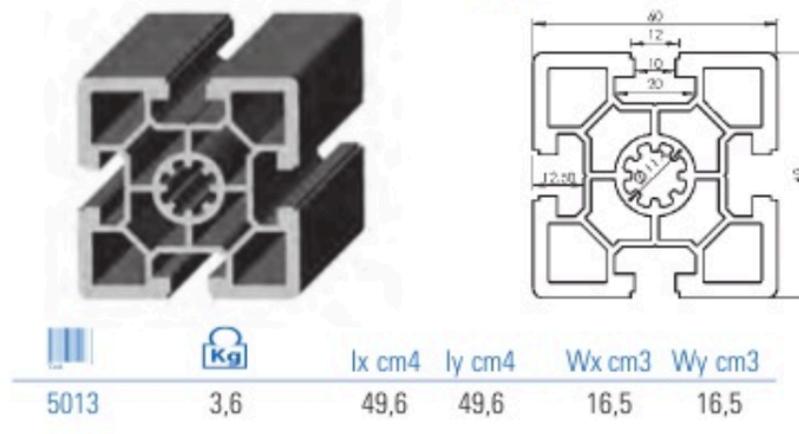


Figura 26 Perfil “Fasten”.

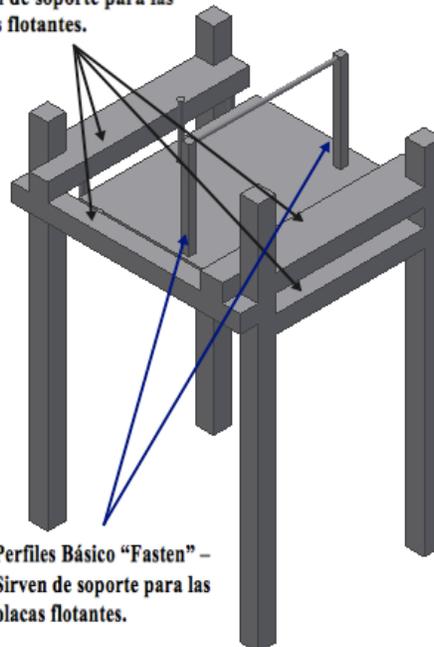
- **Accesorios de medida.**

Se puede complementar la balanza basada en células extensiométricas con un sistema de adquisición de datos para evitar la necesidad de implementar uno con los errores y fallos que eso puede suponer.

- **Implementación final.**

En base a los criterios de diseño establecidos a lo largo del proyecto y con el objetivo final al que se desea llegar se procede al diseño en el programa “AutoCAD Inventor”. En las Figuras que se exponen a continuación se puede observar el diseño final con sus respectivas vistas.

**Perfiles Pesados “Fasten” –
Sirven de soporte para las
placas flotantes.**



**Perfiles Básico “Fasten” –
Sirven de soporte para las
placas flotantes.**

Figura 27 Vista general descubierta izquierda.

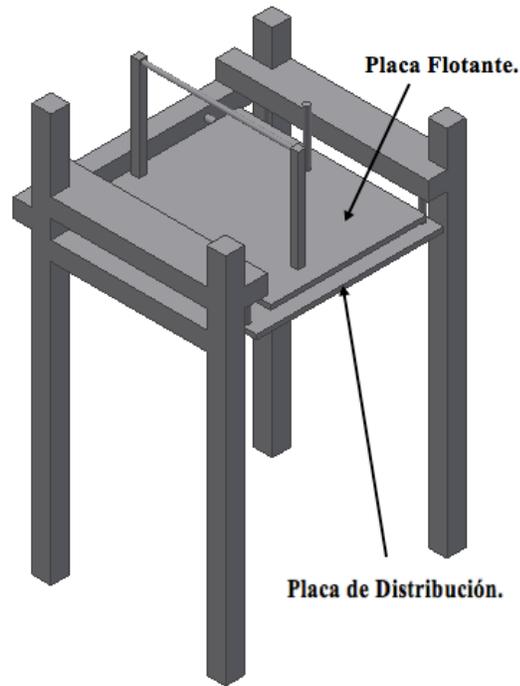


Figura 28 Vista general descubierta derecha.

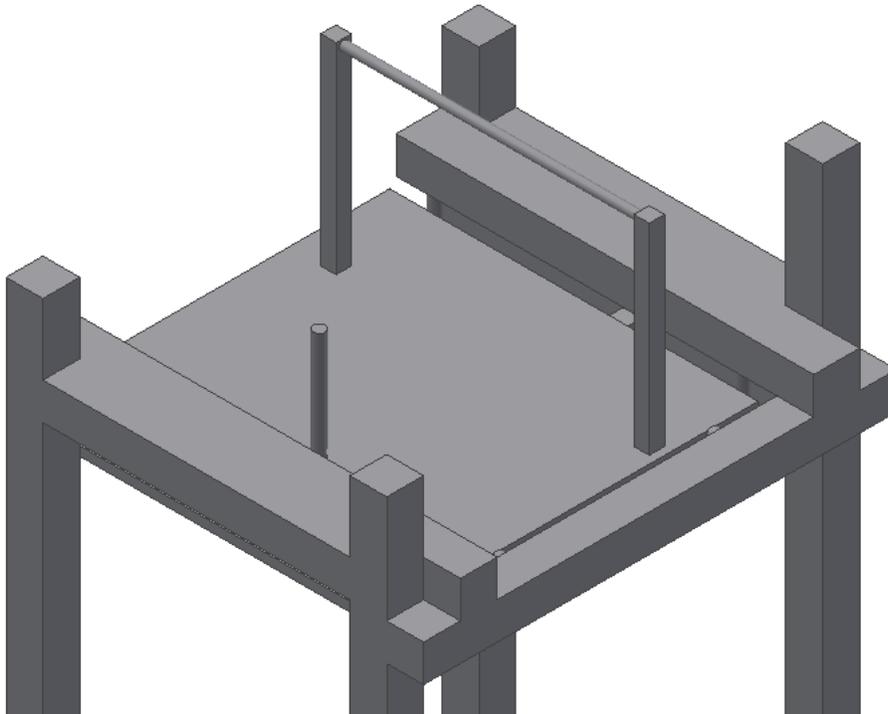


Figura 29 Vista general descubierta al detalle.

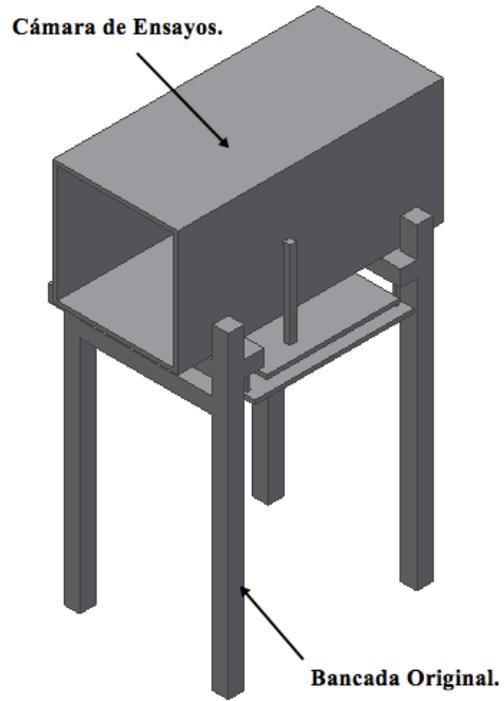


Figura 30 Vista general cubierta derecha.

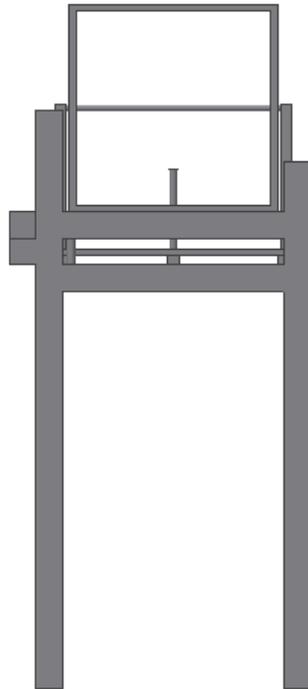


Figura 31 Vista general cubierta frontal.

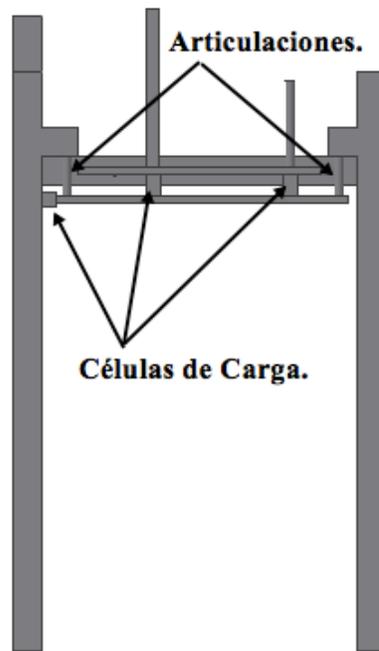


Figura 32 Vista derecha.

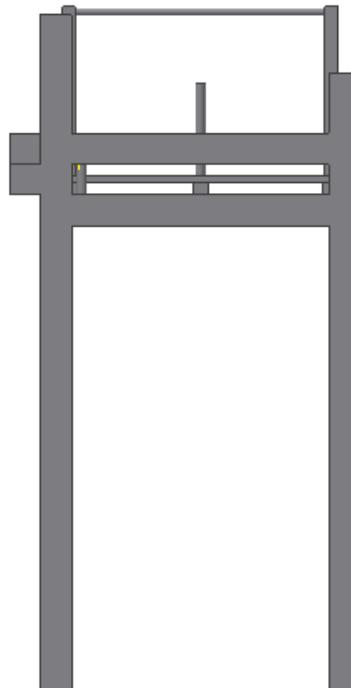


Figura 33 Vista frontal.

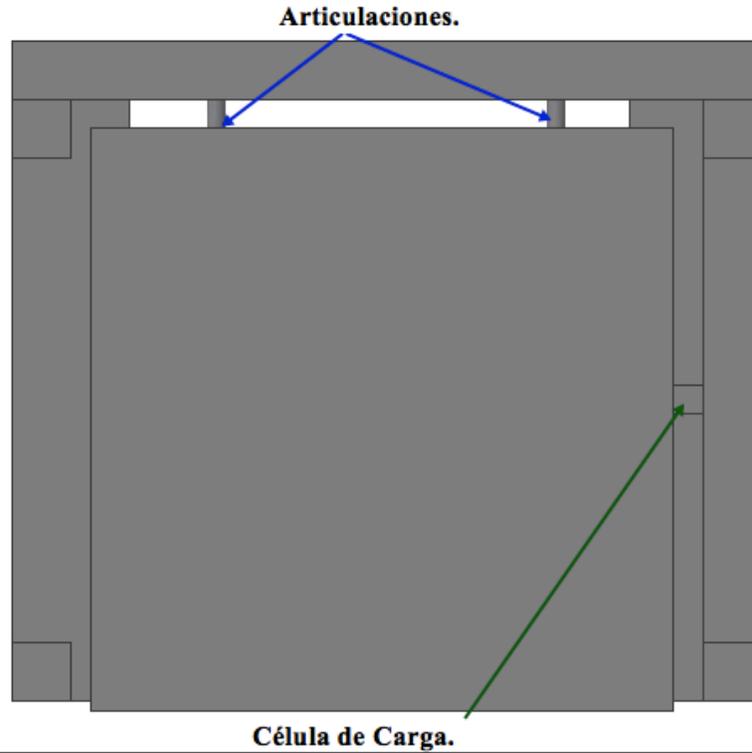


Figura 34 Vista inferior.

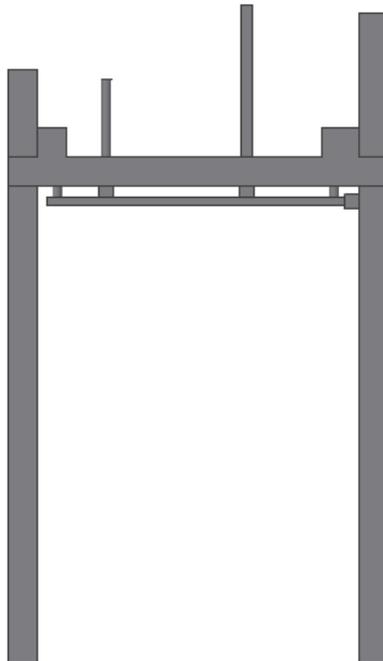


Figura 35 Vista izquierda.

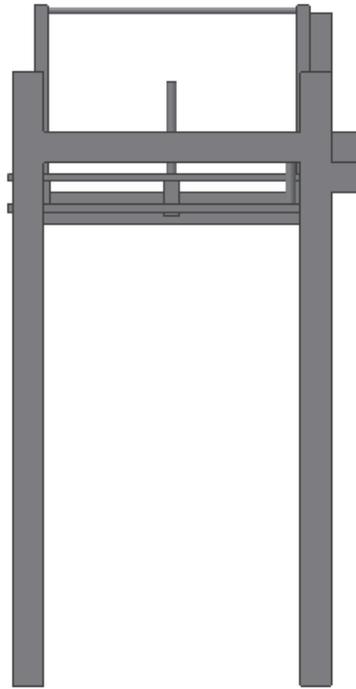


Figura 36 Vista posterior.

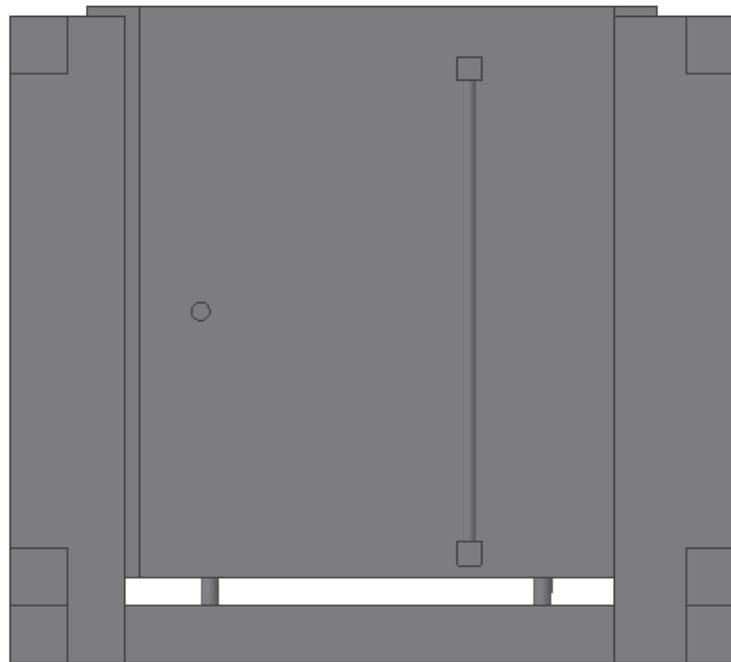


Figura 37 Vista superior.

En la Figura 38 se puede observar directamente la bancada aerodinámica diseñada, ya que se ha retirado la estructura existente actualmente para una mejor visualización en detalle.

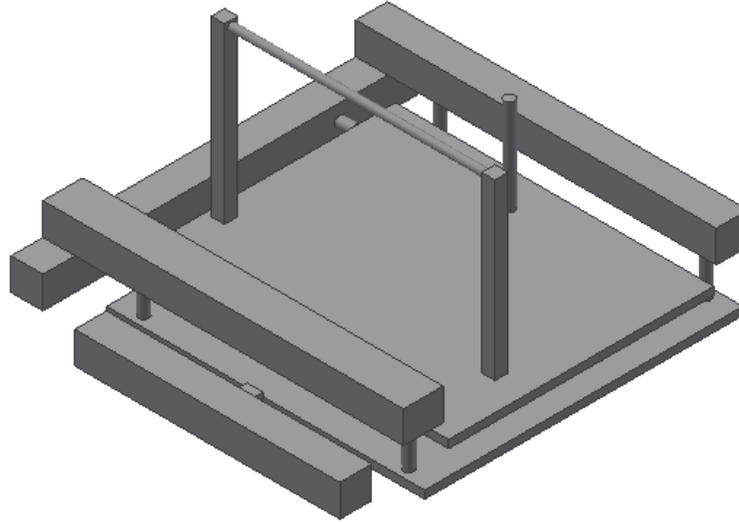


Figura 38 Balanza en detalle

G. Cálculos básicos.

Lo que más nos interesa conocer en el diseño de una balanza para túnel de viento es lo máximo que se puede deformar la estructura al aplicar una carga hipotética máxima con un factor de seguridad. En las Figuras 38 y 39 se puede observar una imagen del estudio de la deformación al aplicar una carga de 120 N, como se puede comprobar, la deformación que se produce es prácticamente nula y por lo tanto no tendrá ninguna influencia en los resultados de los ensayos finales.

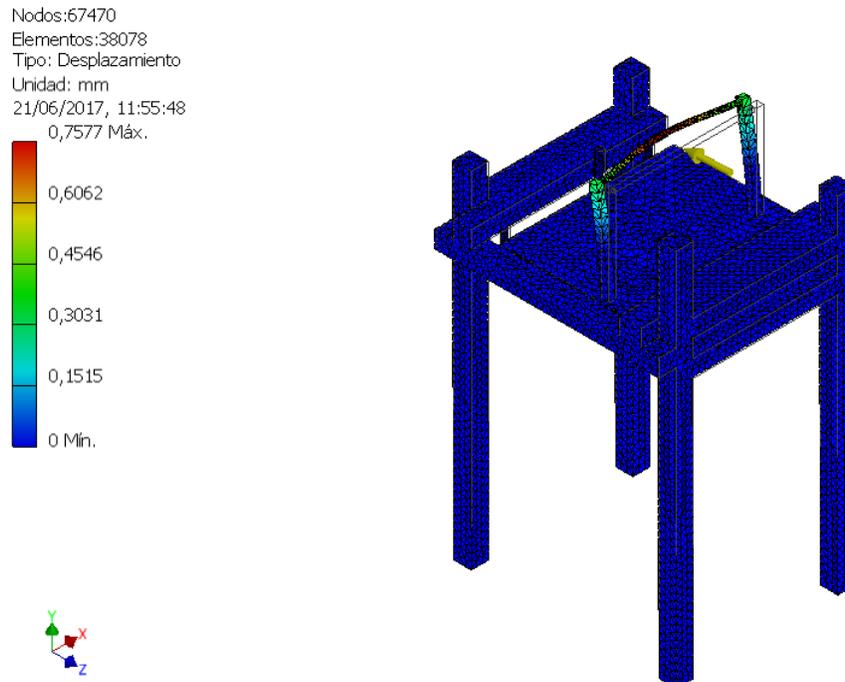


Figura 39 Deformación.

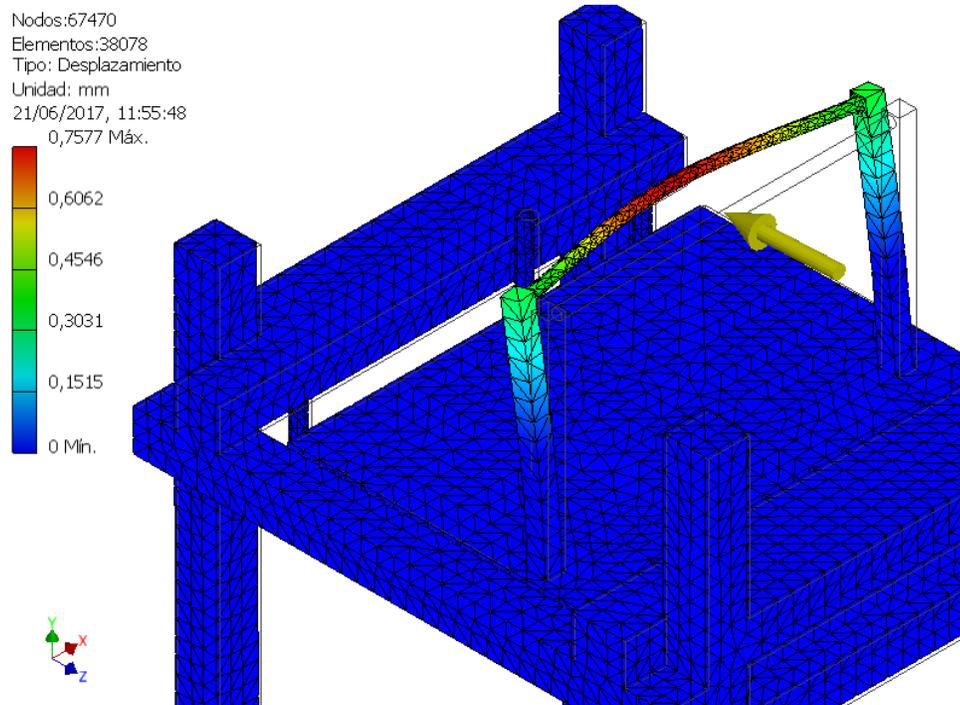


Figura 40 Deformación al detalle.

También se ha realizado un estudio de la Tensión de Von Mises que se puede visualizar en la Figura 40. La Tensión de Von Mises es despreciable ya que se esta en el orden de 10 MPa.

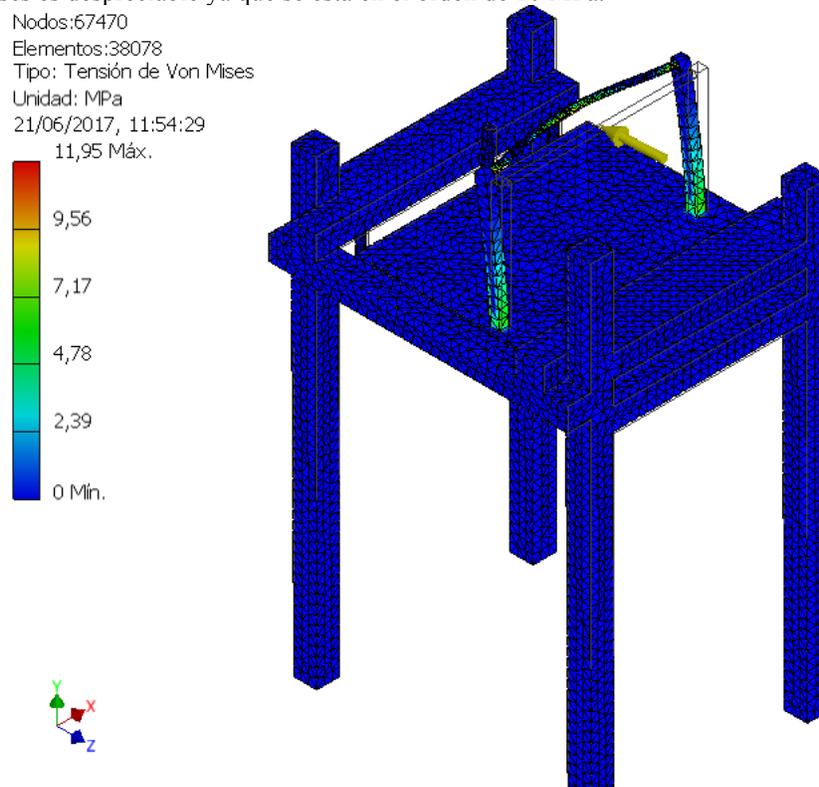


Figura 41 Tensión de Von Mises.

En el Anexo 1 se adjuntarán los planos con las vistas de la estructura de la balanza y su respectivas cotas para su fabricación y construcción.

H. Selección de materiales.

Para la estructura se emplearán perfiles pesados “Fasten”, escuadras de ángulo recto, tornillos y tuercas. Los perfiles son fabricados en Aluminio 6061. En la Figura 41 expuesta anteriormente se puede observar la tipología de estos perfiles. Además también se adquirirán una serie de rótulas para permitir movimientos relativos entre las placas.

La placa de distribución y la placa inferior serán placas gruesas de Aluminio 6061. Estas placas deben ser cortadas y agujereadas de forma precisa para que se ajuste a las especificaciones y por tanto a los planos realizados.

Las galgas extensiométricas seleccionadas son de compresión o tensión en subminiatura de 19 mm de diámetro, las cuales disponen de dos pernos de montaje para una fácil instalación. Se proporcionan con calibración de 5 puntos. En la Figura 41 se pueden visualizar las células de carga seleccionadas.



Figura 42 Células de carga LCM201.

A continuación se expone una tabla resumen con las características más relevantes de la célula de carga.

Excitación	10 Vcc, 15 Vcc máx
Salida	2 mV/V nominal
Precisión	+/-1,0% salida a escala completa de linealidad, histéresis y receptibilidad combinadas
Calibración en 5 puntos (en tensión)	0%, 50%, 100%, 50%, 0%
Balance cero	+2% salida a escala completa
Rango de temperatura de funcionamiento	-54 a 121°C
Rango de temperatura compensada	16 a 71°C
Clase de protección	IP54
Sobrecarga segura	150% de capacidad
Sobrecarga máxima	300% de capacidad
Resistencia de entrada	360 Ohm mínimo
Resistencia de salida	350 +/- 10 Ohm
Construcción	Acero inoxidable
Eléctrica	Cable de 1,5 m de 4 conductores con placa de compensación

Tabla 1 Propiedades células de carga LCM201.

Como sugerencia se incluye la selección de un sistema de adquisición de datos, el cual será el iNET-400 de datos analógicos y digitales extensible a 1000 canales. Se conecte directamente la célula de carga y posee salidas y entradas analógicas y digitales. Dispone de un software gratuito instruNET World y un hardware de alta velocidad USB 2.0 High para Windows. En la Figura 42 se puede observar el sistema de adquisición de datos en cuestión.



Figura 43 Sistema de adquisición de datos iNET-400.

El sistema de adquisición de datos analógicos y digitales iNET-400 es una caja de tarjetas captadoras de bajo costo que se conecta a ordenadores con Windows a través de USB 2.0. La ventaja de una caja de tarjetas es que se puede seleccionar qué módulos de E/S instalar como necesario para construir un sistema personalizado. La caja de tarjetas INSTRUNET normalmente tiene un módulo de medición A/D y los módulos adicionales ofrecen acondicionamiento de señales. La señal analógica acondicionada se encamina al módulo A/D a través de la placa posterior. Esto es drásticamente diferente de los sistemas comparables que colocan una electrónica de medición A/D en cada módulo. La ventaja de la topología de iNET-400 es el coste. Los módulos de medición iNET-400 tienen entradas universales que permiten conectar directamente cada canal a uno de sensor, ya sean termopares, termistores, galgas extensiométricas, celdas de carga, contadores/temporizadores, RTD, voltaje, corriente, resistencia y acelerómetros.

Por último, el actuador eléctrico seleccionado para variar el ángulo de ataque es el actuador lineal LA22 de la empresa LINAK. El LA22 es un actuador lineal especialmente diseñado con una pequeña dimensión para facilitar su uso en la Automatización industrial. Gracias a sus reducidas dimensiones exteriores y el diseño lineal, el LA22 es muy adecuado para aplicaciones donde el espacio de instalación es limitado. En la Figura 43 se puede ver una imagen del dispositivo.



Figura 44 Actuador lineal eléctrico LA22.

En el Anexo 2 se adjuntan las fichas técnicas de estos elementos.

XVI. MANTENIMIENTO.

El mantenimiento se entiende como un conjunto de acciones y técnicas que permiten conservar o restablecer un equipo a un estado específico y asegurar un determinado servicio con un coste mínimo y máxima seguridad.

Existen tres tipos de mantenimiento, correctivo, preventivo y modificativo. El mantenimiento correctivo se caracteriza por realizar las reparaciones o después del fallo. El mantenimiento preventivo se caracteriza por realizar las reparaciones o respectivas tareas de mantenimiento previas al fallo, puede ser programado o predictivo. Por último, el mantenimiento modificativo en el cual se realizan modificaciones complementarias a lo largo de la vida útil del equipo con el fin de mantenerlo actualizado.

Según estos tipos de mantenimiento, el mantenimiento que se ha estado llevando a cabo en el equipo actual es el mantenimiento correctivo, el cual, tiene como objetivo proseguir con el servicio mediante una planificación sencilla, con una baja inversión pero con unos elevados costes globales. Este tipo de mantenimiento no es el deseable para ningún equipo de investigación. Por lo tanto, para el equipo que se ha diseñado emplearemos el mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo o condicional se basa en la realización de ciertas inspecciones periódicas y llevar a cabo sustitución de piezas o realizar reparaciones en ellas si se observan una serie de indicios que puedan llevar a error en los ensayos. Por lo tanto, este tipo de mantenimiento esta subordinado a la condición o estado. Este tipo de mantenimiento tienen un compromiso entre la máxima utilización de la vida útil del conjunto y el coste.

Como ventajas tiene el seguimiento de la evolución, por lo tanto una buena seguridad, reducción de costes y tiempos, una programación anticipada y un buen aprovechamiento de la vida de piezas.

Las desventajas son una inversión costosa en equipos y formación, un tratamiento de demasiada información y limitaciones técnicas de diagnóstico.

Al tratarse de un equipo de medición, lo principal a tener en cuenta es que en el momento de darle uso este correctamente calibrado. El equipo ha de mantenerse con una limpieza diaria general y una más exhaustiva semanalmente. Se pueden remarcar los siguientes aspectos a revisar previas al uso de la balanza:

- Asegurarse que las células de carga han sido ajustadas, ya que después de cada uso para evitar su deterioro han de ser destensadas.
- Asegurarse que los cables que unen las células de carga al equipo de adquisición de datos estén correctamente conectados.
- Evitar realizar movimientos relativos manualmente entre los componentes del dispositivo a no ser que sea para tareas de mantenimiento y bajo la supervisión de un técnico ya que pueden generarse desajustes o juego entre sus elementos.
- Previo a cada uso es recomendable calibrar la balanza.
- Es muy importante no superar el límite de fuerza especificado aplicable a cada célula de carga.
- Es recomendable no emplear modelos muy pesados y mantenerlos durante un largo periodo de tiempo sobre el soporte de la balanza.

XVII. CALIBRACIÓN.

Una vez realizada la fabricación de la balanza y su instalación en el túnel de viento se procederá a su calibración. La calibración es uno de los puntos clave, ya que una mala calibración llevaría a errores en los resultados obtenidos y los ensayos serían defectuosos. Una buena calibración de la balanza permite obtener resultados de ensayos precisos y poder predecir de forma correcta todos los fenómenos existentes en una situación real extrapolable por semejanza. Se ha de pensar un procedimiento de calibración en el que se puedan establecer relaciones entre la señal eléctrica emitida por las células de carga y la fuerza ejercida sobre el modelo, así como los mecanismos que permiten obtener dichas relaciones y los valores de los coeficientes de calibración que determinan las relaciones mencionadas. Para validar el correcto procedimiento de calibración se emplean perfiles alares de los cuales para cada ángulo de ataque se conocen los resultados de fuerzas y momentos aerodinámicos que aparecen para cada velocidad del viento y se compara con los que se obtienen mediante la balanza calibrada. Si los resultados coinciden con los esperados o son muy próximos se puede determinar el nivel de precisión de la balanza.

Para realizar la calibración de la balanza se deberá fabricar mediante perfiles “Fasten” una estructura de calibración. Sobre la estructura de calibración se dispondrán una serie de poleas, ganchos, cables de acero y pesos calibrados para aplicar carga sobre las células extensiométricas.

Para el proceso de calibración se someterá a la balanza a diversas cargas puras en la dirección axial de las células de carga, tanto de tracción como de compresión. Se realiza una gráfica en la que se representa en el eje de ordenadas el voltaje que marca cada célula de carga en el sistema de adquisición de datos y las fuerzas que se aplican sobre ellas sobre el eje de abscisas. Sobre la curva que nos aportan estos resultados se realiza una regresión lineal y se determina la ecuación de relación que existe entre voltaje y fuerza aplicada sobre cada célula de carga.

La quinta célula de carga, la que se dispone entre la placa de distribución y el actuador trasero, se puede calibrar fuera de la balanza y, por tanto, de forma independiente, lo cual es una gran ventaja dada su facilidad.

XVIII. COSTES FUTUROS.

En este apartado se llevará a cabo un estudio de los costes futuros que supone la fabricación y puesta en marcha de una balanza para túnel de viento subsónico. El IVA que se impondrá al total del coste es del 21%, ya que es el valor vigente en la actualidad.

En la realización del proyecto han de tomar parte técnicos del taller, ingenieros técnicos e ingenieros aeronáuticos. Todos estos tendrán su respectivo sueldo por hora empleada en la realización del proyecto.

El proyecto se divide en cuatro fases:

- 1) Análisis de ensayos a realizar y la forma de llevarlos a cabo: En esta fase los ingenieros comienzan el desarrollo conceptual de los objetivos y de lo que se espera obtener. Además, se fijan una serie de requisitos y necesidades técnicas. Se desarrolla toda la parte teórica.
- 2) Trabajo en el taller: En esta fase con todos los documentos y materiales adquiridos se comienza el montaje de la balanza en el taller siguiendo cuidadosamente los planos e indicaciones establecidas por el ingeniero.
- 3) Ensayos de prueba sobre la balanza: En esta fase se comienza a testar la balanza ya construida y se comprueba que todo funciona como se espera.
- 4) Análisis y procesamiento de información: En esta fase se recaba toda la información y se corrobora con información de referencia que la balanza cumple el objetivo establecido.

En los subapartados sucesivos se desglosan los diversos costes esperados.

A. Presupuesto fabricación de pieza adicionales.

A lo largo de el proyecto se han enumerado todas las piezas de las que ha de constar la balanza, algunas de ellas han de ser fabricadas en el taller. En este subapartado se hace referencia a aquellos costes de elementos que no existen en venta en el mercado.

Las placas de aluminio deben ser gruesas y ser cortadas y agujereadas de forma precisa para que se ajuste a las especificaciones y por tanto a los planos realizados.

Para llevar a cabo esta fabricación se requiere la intervención de dos técnicos y un ingeniero aeronáutico, debido a que no solo se ha tenido que fabricar, sino desarrollar la idea y crear los planos.

En la siguiente tablas 2 y 3 se muestran los costes de las piezas y de personal:

Pieza	Cantidad	Material	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Placas	2	Aluminio 6061	443	886
Total				886

Tabla 2 Coste del material empleado.

Cargo	Función	Hora	Salario/hora	Coste total (€)
Técnico taller	Fabricación	5	9.75	48.75
Ingeniero técnico	Desarrollo	8	11.6	92.8
Ingeniero técnico	Fabricación	10	11.6	116
Ingeniero aeronáutico	Desarrollo y creación de planos	40	13	520
Total				777.55

Tabla 3 Recursos humanos empleados en la fabricación de las piezas.

B. Presupuesto de estructura y elementos de medida.

Para la sujeción de las placas flotantes se requiere una estructura robusta y fija al suelo. Actualmente existe una estructura que sirve como sujeción para la cámara de ensayos, la cual nos servirá como apoyo base para el resto de secciones a introducir para la correcta sujeción de las placas. Se emplearán el mismo tipo de perfil que existe actualmente, el perfil pesado “Fasten” mencionado con anterioridad, escuadras de ángulo recto, tornillos, tuercas, células de carga, articulaciones y rótulas.

Los perfiles pesados “Fasten” tienen una longitud de 150 mm, pero se necesita cortarlos para poder acoplarlos en la estructura. Con todo preparado se procede al montaje.

El montaje de las estructuras se realiza con la colaboración de un ingeniero técnico y un ingeniero aeronáutico. En la siguiente tablas 4 y 5 se muestran los costes de las piezas y de personal:

Pieza	Cantidad	Material	Precio unitario	Precio total (€)
Perfil pesado "Fasten"	8	Aluminio 6061	12 €/m	96
Perfil básico "Fasten"	1	Aluminio 6061	6 €/m	6
Escuadras	25	Aluminio 6061	3 €/u	75
Tornillos	50	Acero Inox	2 €/u	100
Tuercas	50	Acero Inox	2 €/u	100
Rótulas	10	Acero Inox	6 €/u	60
Articulaciones	22	Aluminio 6061	5 €/u	110
Células de carga	5	Acero Inox	495 €/u	2.475
i-NET400	1	-	1.255 €/u	1.255
Actuador				202
Total				4.479

Tabla 4 Material empleado en el montaje de las estructuras.

Cargo	Función	Hora	Salario/hora	Coste total (€)
Ingeniero técnico	Montaje estructura	15	11.6	174
Ingeniero aeronáutico	Montaje estructura	35	13	455
Total				629

Tabla 5 Recursos humanos en el montaje de las estructuras.

C. Coste total montaje.

Realizando la suma de todos los costes parciales de cada apartado se puede obtener el coste total del montaje que exponemos en la siguiente tabla.

Concepto	Coste (€)
Fabricación piezas	886
Montaje estructuras	4.479
Recursos humanos	1.406,55
SUMA	6.771,55
IVA (21%)	1.422,03
TOTAL	8.193,58

Tabla 6 Coste total.

XIX. CONCLUSIONES.

A lo largo de todo el proyecto se han establecido conceptos aerodinámicos y aeronáuticos que se han ido adquiriendo a lo largo de todo proceso de formación de un graduado en Ingeniería Aeroespacial, lo cual es coherente con el objetivo general de un Trabajo de Fin de Grado. Gracias a todo el desarrollo del proyecto se ha tenido que recurrir a todo tipo de apuntes de asignaturas impartidas durante los cuatro años de formación.

Este proyecto se ha planteado en todo momento con el fin de llevar a cabo la construcción de la nueva balanza para el túnel de viento, por lo tanto, en base a principios reales y como una situación de trabajo futuro real. El diseño de equipos de ensayo para investigaciones aeronáuticas es una de las competencias que se adquieren en el grado.

Gracias al guiado continuo de tanto el Director como el Codirector de proyecto se ha podido desempeñar un trabajo lo más realista posible y con la posibilidad y deseo de una futura implementación del proyecto. Las especificaciones marcadas han sido la base para el diseño y todo el desarrollo de la balanza ha sido basado en la ya balanza construida en Von Karman Institute for Fluid Dynamics como Trabajo de Fin de Master por el alumno graduado en Ingeniería Aeroespacial Jorge Ramos.

Una vez terminado el documento teórico y todo el diseño de la balanza se llegó a la determinación que no era posible la fabricación de la balanza por los impedimentos económicos principalmente actualmente. Sin embargo, el proyecto se llevará a cabo en un próximo proyecto dada la imperiosa necesidad de un nuevo prototipo de balanza para túnel de viento para futuros ensayos académicos lo más realistas y fiables posible.

Las mayores dificultades encontradas, han sido por un lado conseguir adaptar un diseño de balanza capaz de medir de forma independiente todas las componentes fuerzas y momentos aerodinámicos por los requerimientos del proyecto y, por otro lado, la obtención de información con respecto a balanzas de túnel de viento.

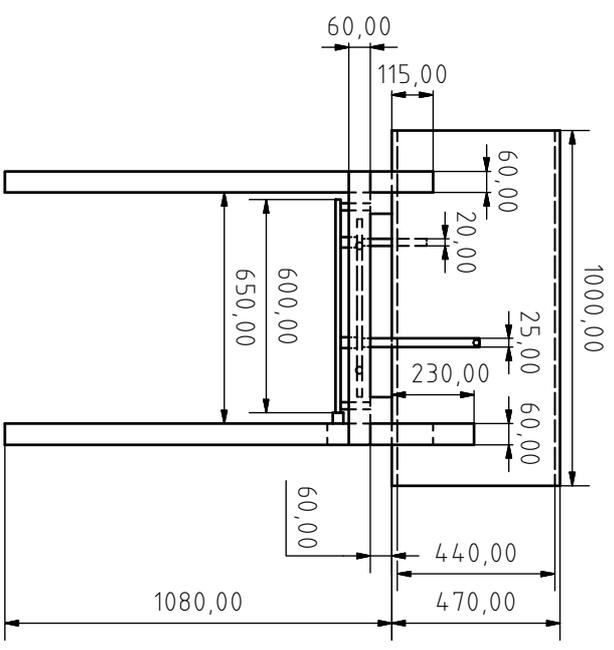
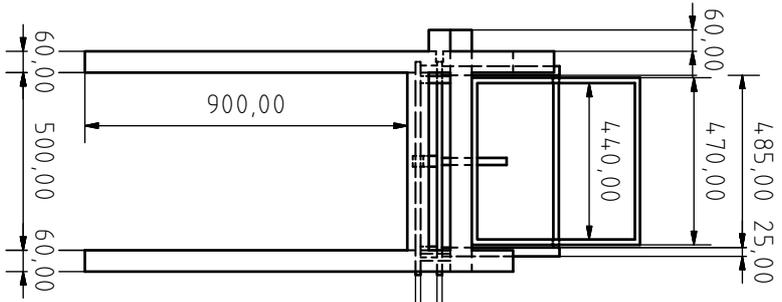
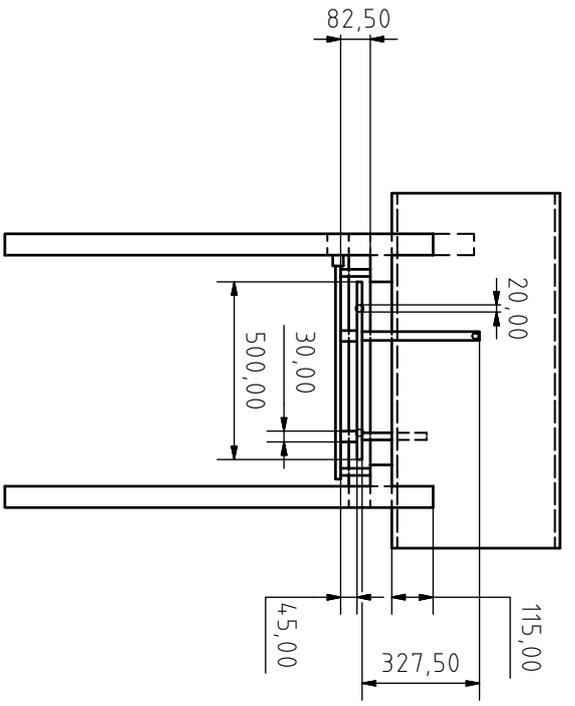
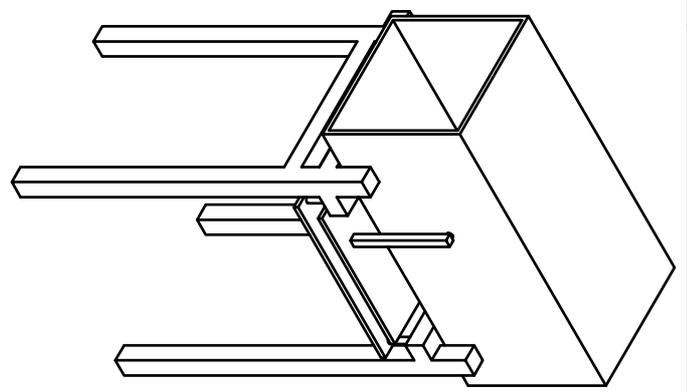
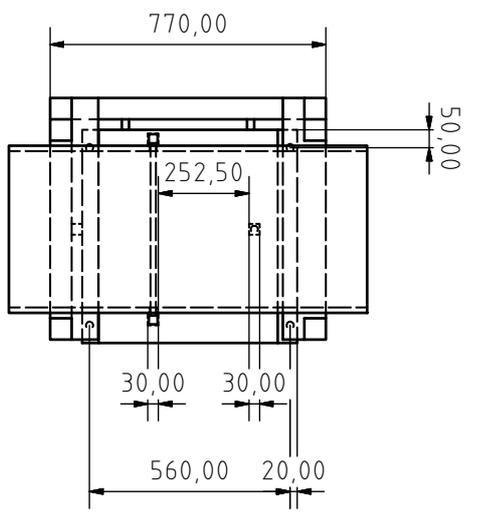
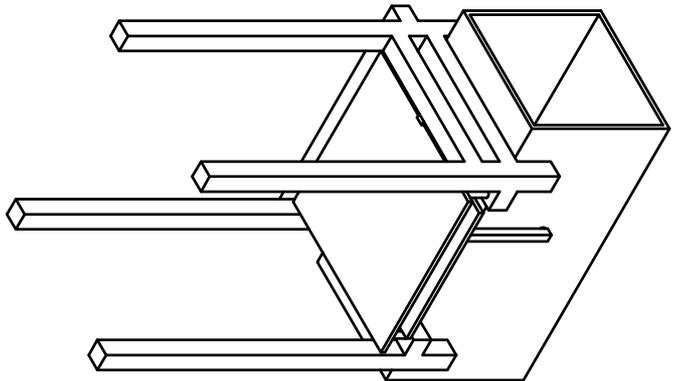
Como conclusiones generales se pueden establecer las siguientes:

- 1) El diseño de la balanza es muy importante para obtener resultados precisos de los ensayos. Siempre es complejo medir momentos en balanzas de plataforma, porque en ellas aparece como pequeñas diferencias entre dos señales de fuerzas. En este diseño, mediante la adición de la célula de carga trasera entre el actuador y la placa de distribución, será posible medir con una buena precisión y de forma independiente todas las fuerzas y momentos, resolviendo este problema.
- 2) La precisión no es sólo función del diseño de la balanza, sino que es realmente dependiente de la gama y la precisión de las células de carga. Por esta razón es muy importante en las primeras etapas de diseño tener una estimación precisa de las fuerzas y momentos que se generarán en el modelo más crítico medible, con el fin de obtener los picos de fuerza aplicados a las células de carga y la estructura, pudiendo elegir celdas de carga en el rango capaz de medir estas fuerzas y seleccionar el modelo capaz de medir ese rango con la mayor exactitud posible.
- 3) En las especificaciones de este proyecto, se especificaron las componentes de fuerzas y momentos necesarios para medir.
- 4) Las fuerzas que se esperan en el modelo pueden causar deflexiones sobre partes de la balanza, estas deflexiones pueden convertirse en una fuente de error para los resultados de los ensayos. Para evitar estas deflexiones en ciertos elementos de la balanza, se han tomado diversas soluciones en el diseño. En los perfiles básicos tipo “Fasten” que soportan el modelo se ha procurado su fuerte unión a la placa de distribución mediante su refuerzo con un correcto proceso de remachado y además se han colocado las dos delanteras en la parte externa de la sección de medida con el fin de evitar interferencias del flujo aguas arriba del modelo. Como las células de carga tienen que medir las fuerzas por deformación dentro de ellas, es importante que estén unidas a una superficie rígida, sirviendo esta superficie como referencia para las medidas. Debido a esto, la célula de carga horizontal se une entre la placa inferior y un perfil pesado tipo “Fasten” correctamente fijado a la bancada mediante escuadras y una serie de remaches, y las células de carga verticales son unidas entre la placa de distribución y la placa inferior, esta placa inferior está hecha de tal forma que sea lo más rígida posible, sin exceder mucho el peso.
- 5) La conclusión final extraída del diseño mecánico de la balanza, es que siempre ha de tenerse en cuenta en un proceso real la futura instalación en el túnel de viento y los costes económicos.



XX. ANEXOS.

A. Anexo 1: Planos acotados.



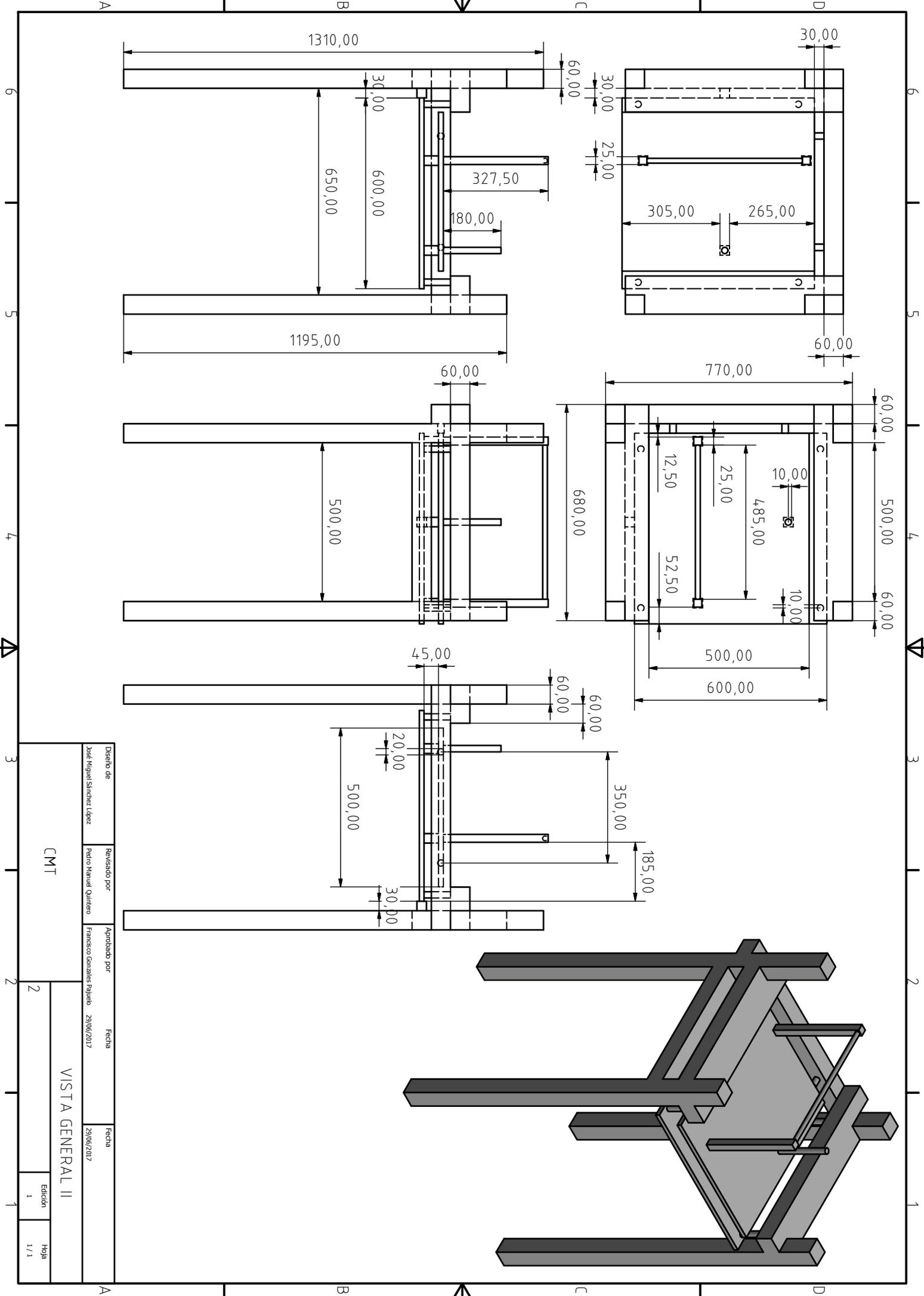
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
José Miguel Sánchez López	Pedro Manuel Quintero	Francisco González	29/06/2017	29/06/2017

CMT

VISTA GENERAL

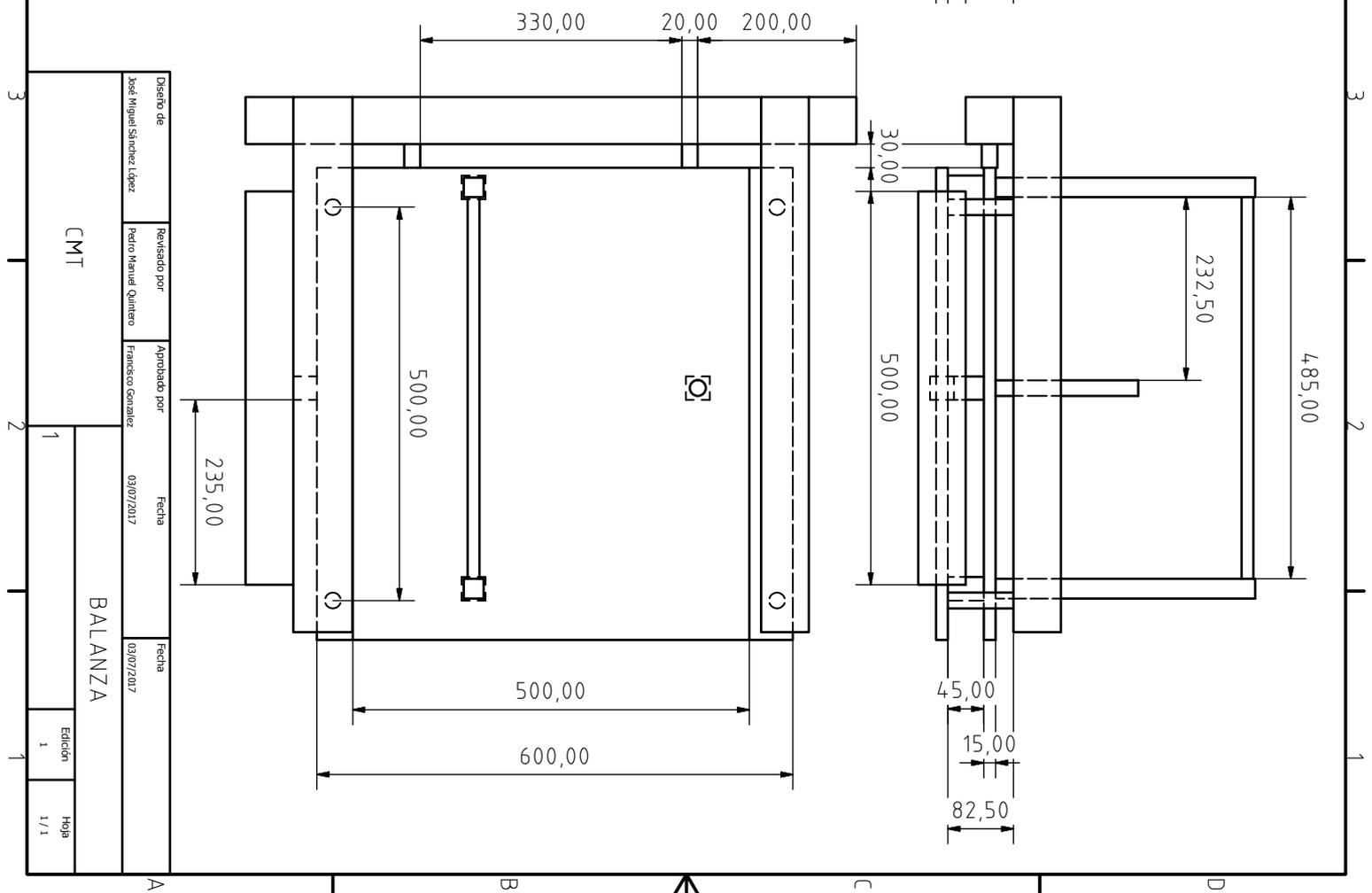
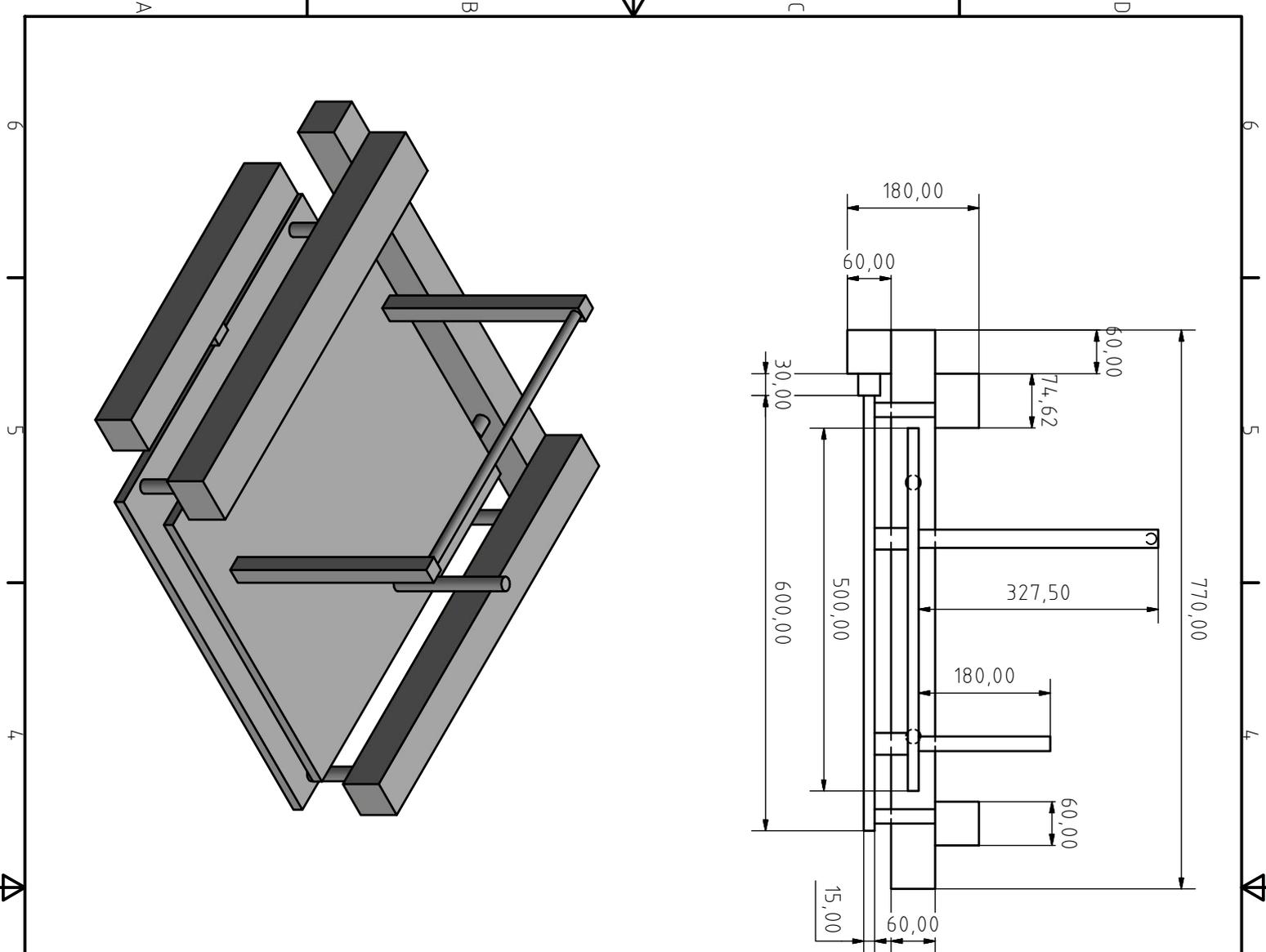
Edición 1/1

Hojas 1/1



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
José Miguel Sánchez López	Pedro Manuel Quintero	Francisco Gonzales Pajuelo	29/06/2017	29/06/2017

CMT		VISTA GENERAL II	
		Edición	Hojas
2	1	1	1 / 1



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
José Miguel Sánchez López	Pedro Manuel Quintero	Francisco González	03/07/2017	03/07/2017

CMT

BALANZA

Edición
1

Hojas
1 / 1

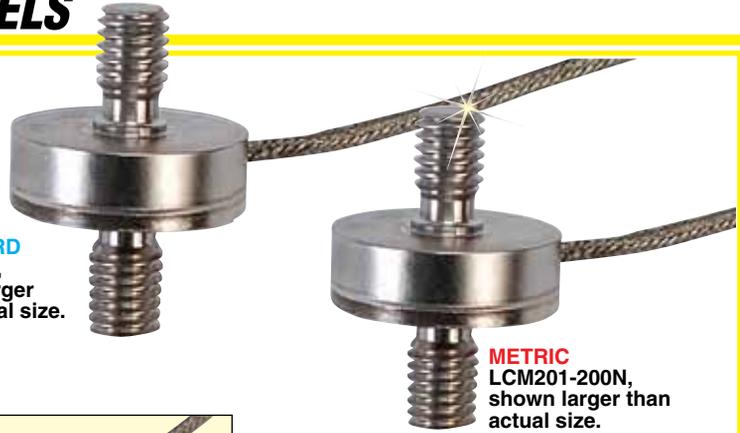
B. Anexo 2: Fichas técnicas.

19 mm (0.75") DIAMETER SUBMINIATURE TENSION OR COMPRESSION LOAD CELLS

STANDARD AND METRIC MODELS

**Tension/Compression
Calibrated in Tension**
0-25 lb to 0-300 lb
0-100 to 0-500 N

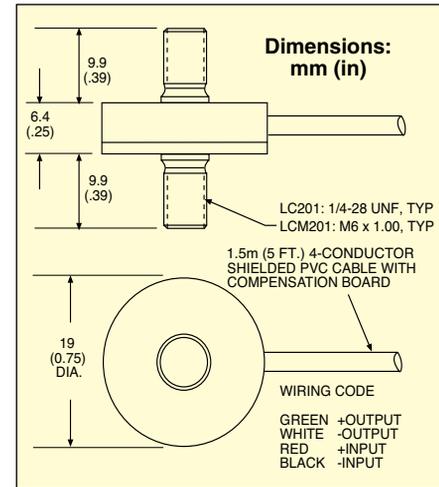
1 Newton = 0.2248 lb
1 daNewton = 10 Newtons
1 lb = 454 g
1 t = 1000 kg = 2204 lb



STANDARD
LC201-50,
shown larger
than actual size.

METRIC
LCM201-200N,
shown larger than
actual size.

LC201/LCM201 Series



- Subminiature Package for Robotic Applications, 19 mm (0.75") Diameter
- Dual Mounting Studs for Easy Installation
- 5-Point Calibration Provided

Thermal Effects:
Zero: 0.018% FSO/°C
Span: 0.018% FSO/°C

Safe Overload: 150% of capacity
Ultimate Overload: 300% of capacity
Input Resistance: 360 Ω minimum
Output Resistance: 350 ±10 Ω
Construction: Stainless steel
Electrical: 1.5 m (5') 4-conductor shielded cable with compensation board

OMEGA's LC201/LCM201 Series subminiature load cells are designed for the demanding environment of industrial automation and robotics. With a diameter of only 19 mm (0.75") and all stainless steel construction, they can fit into small systems. They deliver high accuracy and long-term reliability in a subminiature package.

STANDARD MODELS

To Order				
CAPACITY		MODEL NO.	COMPATIBLE METERS*	ROD END
lb	N			
25	111	LC201-25	DP41-S, DP25B-S	REC-014F
50	222	LC201-50	DP41-S, DP25B-S	REC-014F
75	334	LC201-75	DP41-S, DP25B-S	REC-014F
100	445	LC201-100	DP41-S, DP25B-S	REC-014F
300	1334	LC201-300	DP41-S, DP25B-S	REC-014F

SPECIFICATIONS

Excitation: 10 Vdc, 15 Vdc max
Output: 2 mV/V nominal
Accuracy: ±1.0% FSO linearity, hysteresis, repeatability combined
5-Point Calibration (in Tension): 0%, 50%, 100%, 50%, 0%
Zero Balance: ±2% FSO
Operating Temp Range: -54 to 121°C (-65 to 250°F)
Compensated Temp Range: 16 to 71°C (60 to 160°F)
Protection Class: IP54

METRIC MODELS

CAPACITY		MODEL NO.	COMPATIBLE METERS*	ROD END
N	lb			
100	22	LCM201-100N	DP41-S, DP25B-S	MREC-M6F
200	45	LCM201-200N	DP41-S, DP25B-S	MREC-M6F
300	67	LCM201-300N	DP41-S, DP25B-S	MREC-M6F
500	112	LCM201-500N	DP41-S, DP25B-S	MREC-M6F

Comes complete with 5-point NIST traceable calibration and 59 kΩ shunt data.
* Visit us online for compatible meters. DPiS meter suitable for one direction measurement only.
Ordering Examples: LC201-25, 25 lb capacity subminiature universal load cell.
LCM201-500N, 500 N capacity subminiature universal load cell.

Expandable Modular Data Acquisition System

iNET-400 Series



- ✓ USB 2.0 High Speed Data Acquisition Hardware for Windows® ≥XP SP2, Vista, 7 or 8 (XP/VS/7/8)
- ✓ Analog and Digital Input and Outputs
- ✓ Free instruNet World Software
- ✓ Directly Connects to Thermocouple, RTD, Thermistor, Strain Gage, Load Cell, Voltage, Current, Resistance and Accelerometer Input's
- ✓ Reduce Noise by Placing Boxes Near Sensors and up to 1000' From Noisy Computer
- ✓ Digitize Any Combination of Channels at 166,000 Samples Per Second Aggregate
- ✓ Each Channel has Independently Programmable Analog Filters, Integration Time, Voltage Range, and Sample Rate; Programmable Digital Filters on All Channels (LP, HP, BP, BS)

The iNET-400 system is a low cost card cage that attaches to Windows computers via USB 2.0. The advantage of a card cage is that you can select which I/O modules to install as needed to build a customized system. The instruNet card cage typically has one A/D measurement module and additional modules provide signal conditioning. The conditioned analog signal is routed to the A/D module via the backplane.

This is dramatically different from comparable systems which place A/D measurement electronics on each module. The advantage of the iNET-400 topology is cost. After the 1st module is installed, additional iNET-400 channels are conditioned at a very low cost per channel.

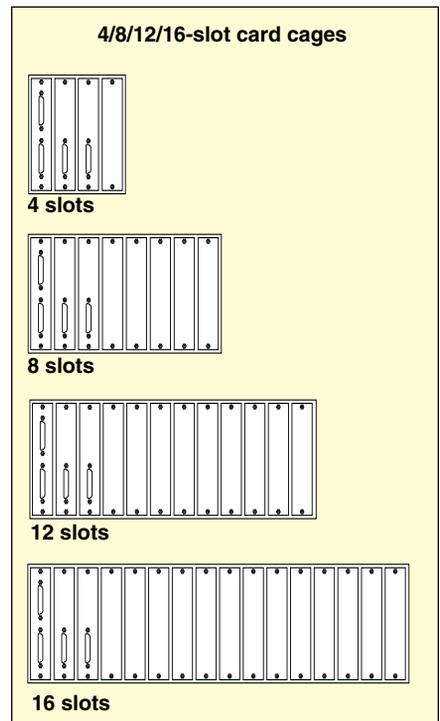


iNET-400 measurement modules have universal inputs that enable one to directly connect each channel to one of: thermocouple, thermistor, strain gage, load cell, counter/timer, RTD, voltage, current, resistance and accelerometer.

Absolute accuracy for all of these sensor types is specified. In some cases, the end user adds an external shunt resistor. The advantage of universal inputs is cost.

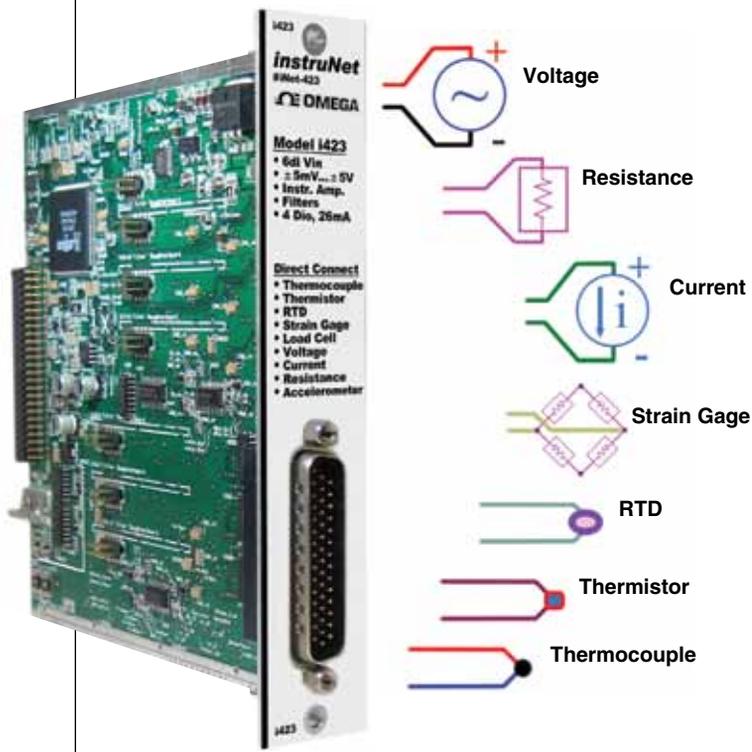
Low Cost 4/8/12/16-Slot Card Cages

The iNET-400 card cage provides 4 slots, and multiple iNET-400's can be bolted together by the end user, side-by-side, to create an 8, 12, or 16 slot system. In many applications, one iNET-400 with 4 slots is sufficient.



Connect Directly to Common Sensors

Data acquisition cards connect directly to thermocouple, thermistor, strain gage, load cell, counter/timer, RTD, voltage, current, resistance and accelerometer.

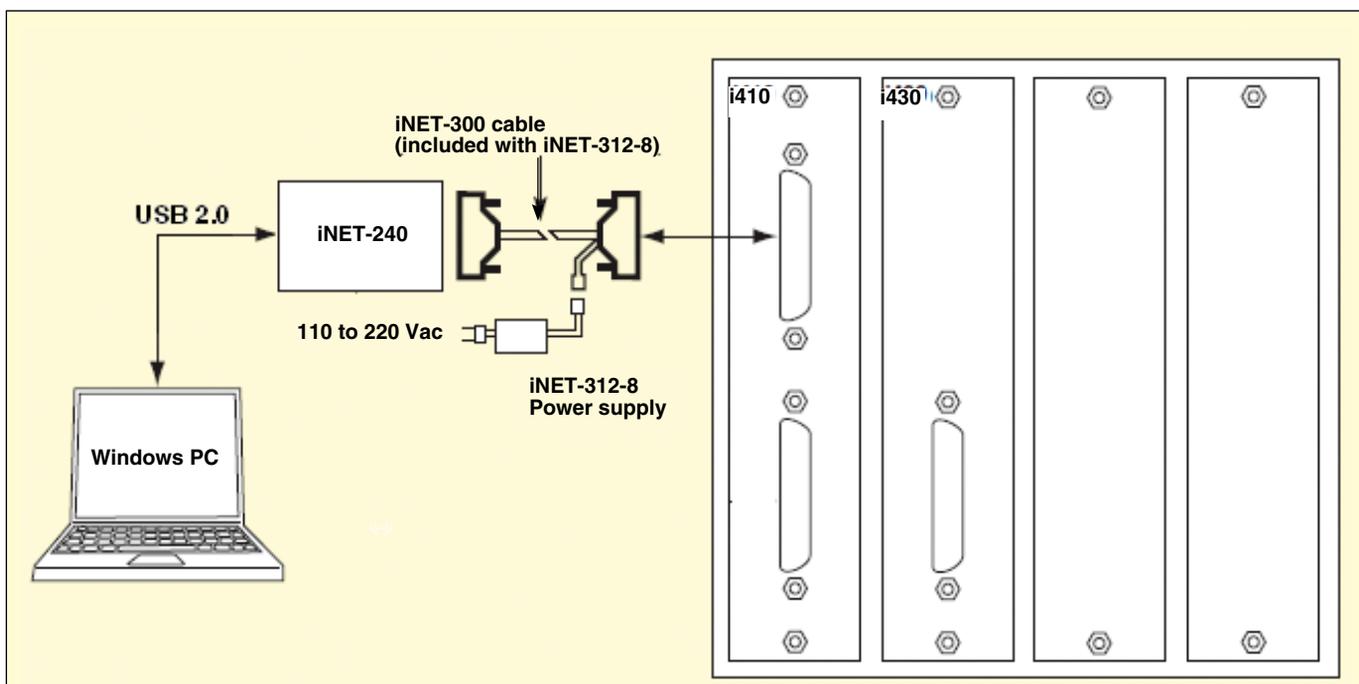


The iNET-400 card cage is 15 D x 11 W x 14 cm H (6 x 4.5 x 5.6") in size. The slots are numbered such that #1 is the left-most slot, #2 is to the right of #1, and so forth and so on. Cards are held into position with jackscrews that are tightened with a slotted screwdriver. Slot #1 is a special slot and is used to interface to a computer.

The iNET-410 card slides into slot #1 and then cables to the computer via a DB25 cable that connects to an InstruNet controller. Also, an iNET-300 Power Adaptor cable is used to route power from an iNET-312-8 desktop power supply to the iNET-410 interface card in slot #1, which in turn routes that power to the card cage backplane (i.e. pcb at back of card cage that attaches to all cards). This is illustrated in the below diagram.

The iNET-400 Card Cage needs at least one iNET-430 A/D card if analog voltages are to be measured. The iNET-430 cards includes an A/D converter and serves this purpose.

The iNET-420 and iNET-423 cards contain various signal conditioning circuits and route signals along the backplane to the iNET-430 for measurement. This happens automatically and does not require programmer intervention, other than insertion of cards and attaching end user signals to the card's front panel connectors.



iNET-240 instruNet DSP Card

Each instruNet Network is controlled by an instruNet DSP controller card that attaches to a Microsoft Windows computer. The iNET-240 attaches to a free USB 2.0 high speed port (requires Windows ≥ XP SP2). Each Controller is an independent computer in itself that utilizes a powerful 32-bit DSP processor and onboard RAM to control all aspects of data acquisition along its network. All real-time tasks are off-loaded to this processor, therefore the host computer is not burdened with real-time issues. Between 1 and 4 controllers can be installed, space permitting, since each controller operates independently.

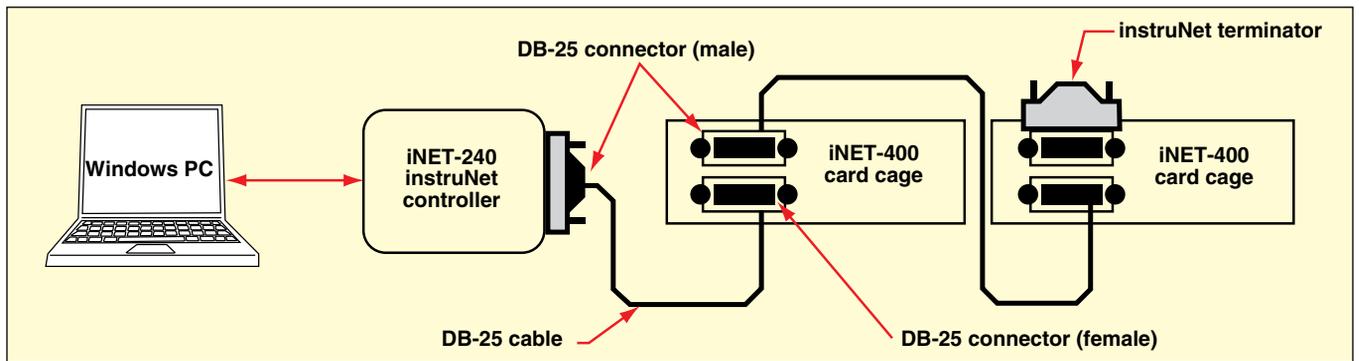


Connect up to 8 iNET-400 Card Cages

Each instruNet network supports up to 8 instruNet iNET-400 card cages.

instruNet Network

These devices are connected in a daisy-chain configuration to form a chain of Devices. Each network can be up to 300 meters long. All networks are anchored with an instruNet Terminator at the far end, and an instruNet Controller at the near end. This makes instruNet a cost effective method for designing large scale, high speed, multi-channel data acquisition systems.



Summary of Computers Compatible with instruNet

Model No.	Controller Type	Size	Computer Required
iNET-240	USB 2.0	4 x 2 x 1"	32-bit or 64-bit Windows ≥ XP SP2, Vista, 7 or 8 (XP/VS/7/8) Computer with 1 available USB 2.0 High Speed port (480Mbaud).

instruNet Version ≥ 3.0 software requires Windows XP, Vista, 7 or 8 (XP/VS/7/8) computer with at least 256MB of RAM Memory and at least 256 MB of free disk space. The iNET-240 USB controller requires 32-bit or 64-bit Windows XP SP2 (service pack #2) or newer.

iNET-400 Series Data Acquisition Cards



iNET-410 Communications Card

The iNET-410 communications card connects an iNET-400 card cage to a Windows computer via an instruNET iNET-240 USB controller. The iNET-410 plugs into the left-most slot (slot #1) of an iNET-400 card cage. One and only one iNET-410 is required per iNET-400 card cage when working with instruNet controllers. The iNET-410 provides the following features:

- Two DB25 connectors allow daisy-chaining multiple iNET-400 card cage devices to one instruNet controller card.
- Front panel red power light shows presence of 5V, 12V and -12V power.
- Front panel green I/O light blinks when computer communicates with card cage.
- Includes one DB25 male to female 3 m (10') cable.

iNET-420 Analog I/O Module

The iNET-420 provides 20 single-ended (SE)/10 differential (DI) voltage input channels and 4 universal digital I/O (20 mA sink, -10V to 30V) and requires the iNET-430 A/D module to measure voltages. The iNET-420 connects directly to voltage, thermocouple, thermistor, RTD, load cell, strain gage, potentiometer, current and resistance inputs.

iNET-423 Analog I/O Module

The iNET-423 provides 6 differential (DI) voltage input channels, 4 universal digital I/O (20 mA sink, -10 to 30V) and requires the iNET-430 A/D module

to measure voltages. The iNET-423 connects directly to voltage, thermocouple, thermistor, RTD, load cell, strain gage, potentiometer, current and resistance inputs. Each input channel passes through it's own amplifier with a software selectable gain of 1 or 64 and optional low pass filter. The 8-pole iNET-500 analog low pass Butterworth filter daughter board is ideal for anti-aliasing. Between one and six filter daughter boards can be installed onto each iNET-423 card (one per channel). There are four different analog low pass filters, each with a different cut off frequency: iNET-500-380HZ, iNET-500-1KHZ, iNET-500-3300HZ and iNET-500-10KHZ.

iNET-430 A/D Module

The iNET-430 provides 16 single-ended (SE)/8 differential (DI) voltage input channels with a 16-bit A/D converter, 2 precision analog voltage outputs ($\pm 10V$, 14-bit D/A), 2 analog voltage outputs (0 to 10 V output, 8-bit D/A) and 4 universal digital I/O (20 mA sink, -10 to 30 V). The iNET-430 connects directly to voltage, thermocouple, thermistor, RTD, load cell, strain gage, potentiometer, current and resistance inputs.

iNET-460 Digital I/O Module

The iNET-460 provides 12 universal digital I/O (20 mA sink, -10 to 30 V) and 16 digital I/O (200 mA sink, -10 to 30 V).

iNET-400 cards are installed by the end user into an instruNET card cage that is 4, 8, 12 or 16 slots wide. Each card is 13 x 2.5 x 13 cm (5.1 x 1.0 x 5.1") in size. Below is a list of available cards.

Model No.	Voltage Input		Voltage Outputs		Digital I/O		
	Number of Channels	Range	Low Pass (KHz)	Number of Channels	Range	Number of Channels	mA Sink
iNET-420	20SE/10DI	$\pm 10V..$ $\pm 20mV$				4	20
iNET-423	6DI	$\pm 5V..$ $\pm 5mV$	0.006,4			4	20
iNET-430	16SE/8DI	$\pm 10V..$ $\pm 10mV$		2 2	$\pm 10V..$ 0-10V	4	20
iNET-460						12 16	20 200
iNET-410	The iNET-410 connects card cage to windows computer via an instruNet controller.						

DATA ACQUISITION SYSTEMS

The following table shows maximum aggregate sample rates for an iNET-240 USB controller attached to an iNET-400 card cage. To calculate the sample rate for each channel, divide by the number of channels attached to the iNET-240 controller. For example, if the maximum aggregate sample rate is 166K samples/sec/controller, and you digitize 4 channels, then you could digitize each channel at 41Ks/sec/channel. Up to four iNET-240 controllers can be attached to a computer to increase total system throughput.

Max Aggregate Sample Rate per Controller (K samples/sec/controller)				
Model No.	±10V Range	±5V Range	±1.2V Range	±10mV.. ±80mV Range
iNET-430	166	166	129	1.4
iNET-430	90	90	83	1.4
iNET-423	113	113	98	68

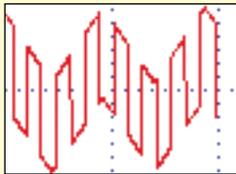
Sensor Connection Table

The table below shows which sensors directly connect to each hardware product. The numbers in the table refer to number of channels. The following sensors require an external shunt resistor: RTD, thermistor, resistance measurement, current measurement, 1/4 bridge strain gage, and 1/2 bridge strain gage. Thermocouple sensors require an iNET-510 Wiring Box attached to the iNET-400 card.

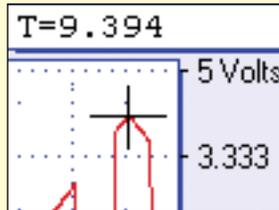
Model No.	Voltage	Current	Resistance	Thermistor	RTD	T/C	Load Cell	Accelerometer	Strain Gage
iNET-420	20SE/10DI	10	10	10	10	10	10	—	10
iNET-423	6DI	6	6	6	6	6	6	6	6
iNET-430	16SE/8DI	8	8	8	8	8	8	—	8

instruNet Software

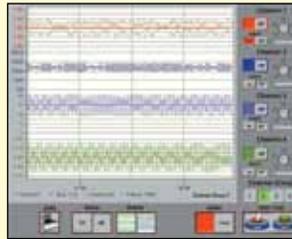
instruNet includes software to interrogate, test, configure, and do I/O with all network channels. This includes an application program called "instruNet World" and interfaces to Visual Basic, C, and C++. instruNet software can configure all I/O channels, store your settings, view digitized data in real time, stream data to disk, and scroll through your waveform post-acquisition. instruNet software runs on Windows computers.



instruNet World



instruNet World Plus (iW+)



DASyLab



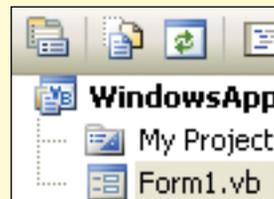
LabView

	A	B
1	Sec	Ch1 Vir
25	1	1.898
26	2	1.887

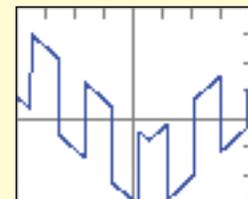
Direct To Excel



C/C++



Visual BASIC



instruNet Scope

The iNET-555 Starter System, shown to the right, provides the following:

- USB 2.0 High Speed Data Acquisition Hardware for Windows \geq XP SP2, Vista 7 or 8 (XP/VS/7/8)
- instruNet Software
- 16se/8di Voltage Inputs, 16-bit A/D
- 2x Precision Voltage Out ($\pm 10V$, 14 bit)
- 2x Voltage Outputs (0..+10V, 8 bit)
- 4x Universal Digital I/O (10V, 30V)
- Connect Directly to Sensors: Voltage, Thermocouple, Thermistor, RTD, Load Cell, Strain Gage, Potentiometer, Current, Resistance.
- Easily expand via 2 free slots in 4 slot iNET-400 Card Cage
- The iNET-555 Includes the Following Products: iNET-240, iNET-430, iNET-510, iNET-400, iNET-410, iNET-312-8.



SPECIFICATIONS

iNET-400

No. of Slots: Each iNET-400 supports up to four cards. Multiple iNET-400's can be bolted together side-by-side to create an 8, 12, or 16 slot system

Material: Solid aluminum construction

Dimensions:

15 D x 11 W x 14 cm H
(6 x 4.5 x 5.6")

Mounting: Place on desktop, affix to DIN rail, 19" rack, or wall mount

ANALOG INPUTS

No. of Channels:

iNET-420: 20 single-ended (SE)/10 differential (DI)

iNET-423: 6 differential (DI)

iNET-430: 16 single-ended (SE)/ 8 differential (DI)

A/D Converter: 16-bit (iNET-430 only)

Voltage: See voltage accuracy/range charts (on next page)

Thermocouple: J/K/T/E/R/S/B/N/C/G/D

Thermistor: 2252 Ω (OMEGA 44000 Series)

RTD: 100 Ω , 500 Ω , 1 k Ω platinum

Load Cell: 10 kg, 25 kg, 100 kg, 250 kg, 1000 kg, 5000 kg

Strain: 350 Ω (1/4 bridge, half bridge or full bridge), 1 k Ω (1/4 bridge)

Potentiometer: 10 k Ω , 50 k Ω

Current: ± 80 μA , ± 120 μA , ± 500 μA , ± 600 μA , ± 800 μA , ± 1.2 mA, ± 2.5 mA, ± 12 mA, ± 24 mA, 0 to 24 mA

Resistance: 0 to 33 Ω , 0 to 100 Ω , 0 to 330 Ω , 0 to 1 k Ω , 0 to 3300 Ω , 0 to 10 k Ω

Common Mode Voltage: ± 10 Vdc (iNET-420 and iNET-430), ± 5 Vdc (iNET-423)

Crosstalk: < -80 dB typical

Input Impedance: 100 M Ω

iNET-430 PRECISION ANALOG VOLTAGE OUTPUTS

No. of Channels: 2

Resolution: 14-bit

Range: $\pm 10.1V$

Output Current Drive: ± 4 mA

iNET-430 ANALOG VOLTAGE OUTPUTS

No. of Channels: 2

Resolution: 8-bit

Range: 0 to 10.1V

Output Current Drive: ± 4 mA

DIGITAL I/O

(iNET-420/423/430)

No. of Channels: 4 universal digital I/O (20 mA sink, -10 to 30V)

Working Voltage: -10 to 30 Vdc

"0" Input Voltage: -10 to 0.65V

"0" Input Current:

Amps = $(4.5V - V_{in})/3900$

"1" Input Voltage: 2.1 to 30 Vdc

"1" Input Current: <1.4 mA

"0" Output Voltage:

<0.8V @ < 5 mA; < 2V @ < 20 mA

"1" Output Voltage: 3.9 to 4.5V

"1" Output Current:

See "1" input current

Pull-Up Resistor: 3.9 k Ω $\pm 10\%$

Schmitt Trigger Input: Yes

ENVIRONMENTAL

Operating Environment:

1 to 45°C (34 to 113°F), <90% RH

Storage Temperature: -20 to 70°C (-4 to 158°F)

POWER

Required: +5 Vdc, ± 12 Vdc required (supplied by iNET-312-8)

User Available: 3.3 Vdc, 5 Vdc, ± 12 Vdc

Thermocouple Range/Accuracy

T/C	Range	Accuracy		
		iNET-420	iNET-423	iNET-430
J	0 to 750°C	±1.2°C	±1°C	±1°C
K	-200 to 1250°C	±1.4°C	±1.4°C	±1.2°C
B	250 to 1540°C	±3.8°C	±4.3°C	±3.7°C
C	0 to 2190°C	±2.6°C	±2.9°C	±2.6°C
D	0 to 1540°C	±2.6°C	±2.9°C	±2.6°C
E	-200 to 990°C	±1°C	±1.2°C	±1°C
G	0 to 2300°C	±5.4°C	±6.2°C	±5.3°C
N	-200 to 1140°C	±1.7°C	±2.2°C	±1.7°C
R	-40 to 1500°C	±2.9°C	±3.6°C	±2.9°C
S	-40 to 1500°C	±2.6°C	±2.9°C	±2.5°C
T	-200 to 400°C	±1.2°C	±1.4°C	±1.2°C



iNET-400 card cage

iNET-410

iNET-430

Shown smaller than actual size.

RTD (Requires OMEGA 10 kΩ shunt resistor iNET-R-10K)

RTD Resistance	Range	Accuracy		
		iNET-420	iNET-423	iNET-430
100 Ω	-200 to -100°C	±3.1°C	±1.4°C	±1.3°C
100 Ω	-100 to 300°C	±0.79°C	±0.79°C	±0.7°C
100 Ω	300 to 850°C	±5.4°C	±5.4°C	±2.6°C
500 Ω	-100 to 300°C	±1.4°C	±1.4°C	±0.84°C
1,000 Ω	-100 to 300°C	±0.44°C	±0.44°C	±0.8°C

Thermistor (Requires OMEGA 10 kΩ shunt resistor iNET-R-10K)

Thermistor Resistance	Range	Accuracy		
		iNET-420	iNET-423	iNET-430
2252 Ω	0 to 100°C	±0.27°C	±0.47°C	±0.47°C

Voltage Range/Accuracy

Voltage Range 1	Absolute Accuracy (MAX Gain + Offset Error) with 1 ms Averaging		
	iNET-420	iNET-423	iNET-430
± 10V	±(0.017% + 671.µV)	—	±(0.017% + 669.4µV)
± 5V	±(0.017% + 364.3µV)	±(0.015% + 347.9µV)	±(0.010% + 332.7µV)
± 2.5V	±(0.017% + 290.7µV)	±(0.015% + 194.2µV)	±(0.010% + 178.9µV)
± 1.2V	—	±(0.016% + 129.8µV)	±(0.010% + 141.9µV)
± 600 mV	—	±(0.016% + 91.8µV)	±(0.010% + 94.6µV)
± 300 mV	—	±(0.016% + 82.9µV)	—
± 80 mV	±(0.015% + 10.3µV)	±(0.018% + 9.8µV)	±(0.015% + 10.1µV)
± 40 mV	±(0.015% + 8.0µV)	±(0.018% + 7.4µV)	±(0.015% + 7.7µV)
± 20 mV	±(0.015% + 7.4µV)	±(0.019% + 6.5µV)	±(0.015% + 7.2µV)
± 10 mV	—	±(0.019% + 5.9µV)	±(0.015% + 6.5µV)
± 5 mV	—	±(0.019% + 5.8µV)	—
0 to 10V	±(0.017% + 364.8µV)	—	—
0 to 5V	±(0.017% + 290.7µV)	±(0.015% + 194.2µV)	±(0.010% + 178.9µV)
0 to 2.5V	—	±(0.015% + 157.3µV)	±(0.010% + 141.9µV)
0 to 1.2V	—	—	±(0.010% + 94.6µV)
0 to 80 mV	—	±(0.018% + 7.4µV)	—
0 to 40mV	—	±(0.018% + 6.9µV)	—

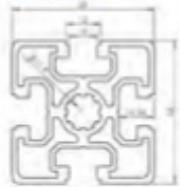


OMEGACARESM extended warranty program is available for models shown on this page. Ask your sales representative for full details when placing an order. OMEGACARESM covers parts, labor and equivalent loaners.

To Order	
Model No.	Description
Starter System	
iNET-555	Starter system, USA plug
iNET-555-EU	Starter system, European plug
iNET-400 Cards	
iNET-410	Interface between iNET-240 controller and iNET-400 card cage
iNET-420	20SE/10DI voltage input, multiplexer, 4 digital I/O
iNET-423	6DI voltage input, amplifier, filter, 4 digital I/O
iNET-430	16-bit A/D, 16SE/8DI voltage input, multiplexer, 4 voltage out, 4 DIO
iNET-460	28 digital I/O channels
iNET-400 Card Cage	
iNET-400	Card cage for iNET-410/420/423/430/460 cards, 4 slots, expandable
<i>Ordering Example: iNET-555 starter system including iNET-240, iNET-430, iNET-510, iNET-400, iNET-410 and iNET-312-8 and OCW-1 OMEGACARESM 1-year extended warranty adds 1-year to standard 1-year warranty.</i>	
Accessories	
Model No.	Description
iNET-510	Wiring box with screw terminals
iNET-511	Wiring box with BNC connectors
iNET-512	Strain gage/sensor wiring box with screw terminals (not for thermocouples - use iNET-510 for thermocouple measurement)
iNET-HD44MF-3M	Cable, Hd44m to Hd44f, 26 Awg, 3 m (10')
iNET-330	Optical isolator between iNET-240 controller and device
iNET-530	Wall and DIN rail mounting kit for one iNET-400 card cage
iNET-500-380HZ	Analog low pass Butterworth filter daughter board for iNET-423 card, 380 Hz cut off frequency (package of 2)
iNET-500-1KHZ	Analog low pass Butterworth filter daughter board for iNET-423 card, 1 kHz cut off frequency (package of 2)
iNET-500-3300HZ	Analog low pass Butterworth filter daughter board for iNET-423 card, 3300 Hz cut off frequency (package of 2)
iNET-500-10KHZ	Analog low pass Butterworth filter daughter board for iNET-423 card, 10 kHz cut off frequency (package of 2)
InstruNet Controller	
iNET-240	USB InstruNet controller for Windows ≥ XP SP2, comes complete with 3 m (10') USB cable, InstruNet network terminator and InstruNet World software on CD (requires iNET-312-8 power supply).
Power Supplies	
iNET-312-8	Power supply, USA Plug, 110/220 Vac, (includes iNET-300 power adaptor)
iNET-312-8EU	Power supply, European plug, 110/220 Vac, (includes iNET-300 power adaptor)
iNET-300	Power adaptor
Software	
iNET-iWPLUS	instruNet World Plus software (iW+)
iNET-380	LabVIEW drivers (LabVIEW versions ≥4 currently supported on Windows ≥XP)
Shunt Resistors	
iNET-R-33	33 Ω, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift
iNET-R-120	120 Ω, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift
iNET-R-350	350 Ω, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift
iNET-R-1K	1000 Ω, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift
iNET-R-3300	3300 Ω, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift
iNET-R-10K	10 kΩ, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift
iNET-R-33K	33 kΩ, 8-pack, 0.05%, 5 ppm/°C drift

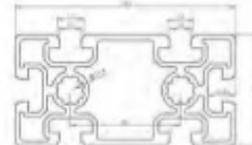
Ordering Example: iNET-240, USB InstruNet controller for Windows ≥ XP SP2.

Perfil básico 50x50 Basic profile 50x50



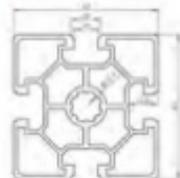
5053	2,3	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		19,7	19,7	7,9	7,9

Perfil básico 50x100 Basic profile 50x100



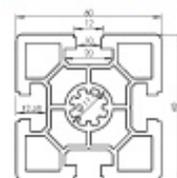
5054	4	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		39,8	152,6	16	30,5

Perfil ligero 60x60 Light profile 60x60



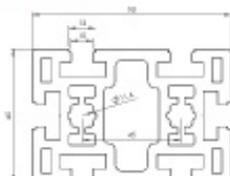
5006	2,5	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		29	29	9,6	9,6

Perfil pesado 60x60 Strong profile 60x60



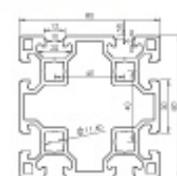
5013	3,6	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		49,6	49,6	16,5	16,5

Perfil básico 60x90 Basic profile 60x90



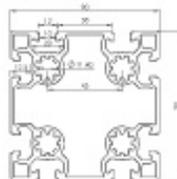
5044	6,7	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		89,6	204,5	29,8	45,4

Perfil básico 80x80 Basic profile 80x80



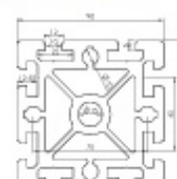
5014	4,5	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		124	124	31	31

Perfil ligero 90x90 Light profile 90x90



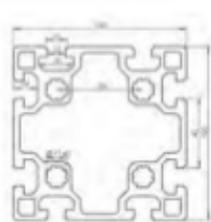
5004	5,1	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		175,1	175,1	38,9	38,9

Perfil pesado 90x90 Strong profile 90x90



5015	10,0	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		303,1	303,1	67,3	67,3

Perfil básico 100x100 Basic profile 100x100



5055	8,0	lx cm4	ly cm4	Wx cm3	Wy cm3
		336	336	67,2	67,2

Actuator LA22

LA22 is an in-line actuator specially designed with a small overall dimension for easy use in industrial, agricultural and rehabilitation products.

Thanks to its small outer dimensions and linear design, LA22 is well suited for applications where installation space is limited, such as on wheelchairs.

Features:

- 12/24 V DC permanent magnet motor
- Max. thrust 400 N (300 N in 12V)
- Stainless steel piston rod and piston rod eye made of reinforced plastic.
- Duty cycle: Max. 10% or 2 min. in use followed by 18 min. not in use.
- Ambient temperature +5° to +40° C
- Compact construction/design
- Protection class: IP51
- Colour: black
- 1.0 m straight cable without plug (no cable with IP51)
- Speed max. 37 mm/s
- Extremely quiet operation
- Max. stroke length 200 mm
- Storage temperature: - 40° to + 70° C

Options:

- Protection class: IP65 (only back fixture D and E)

Usage:

- Should LA22 be used with a non LINAK control unit, please ask the nearest LINAK representative for further details.

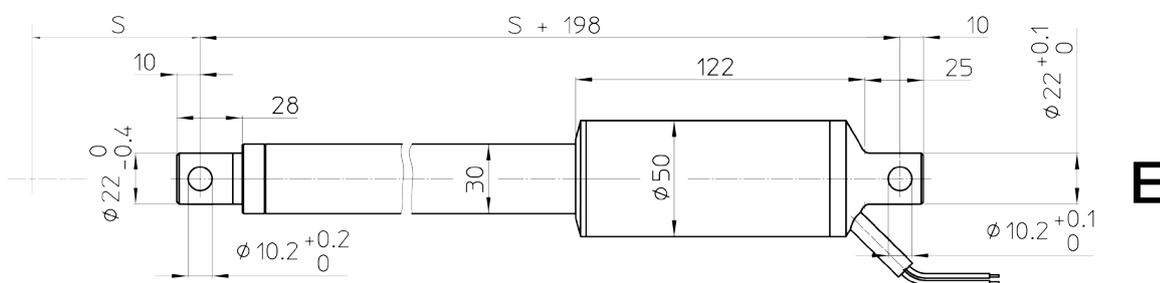
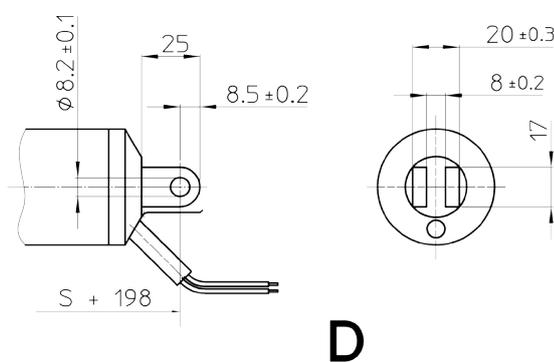


Technical specifications:

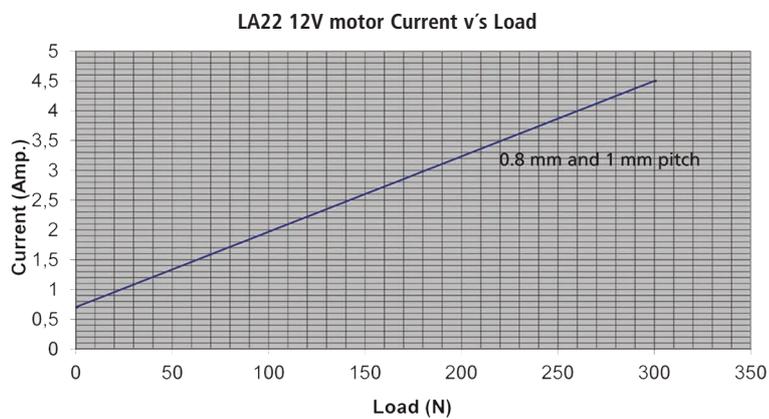
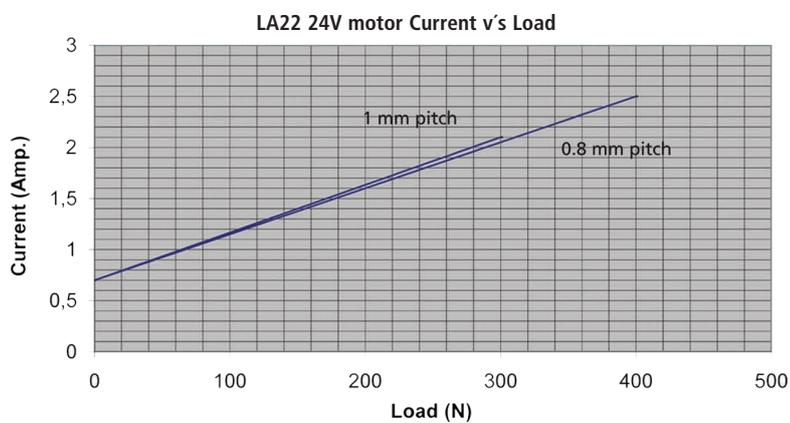
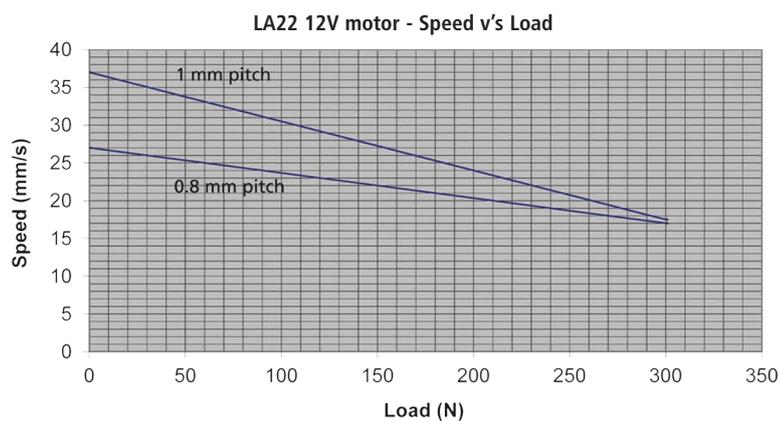
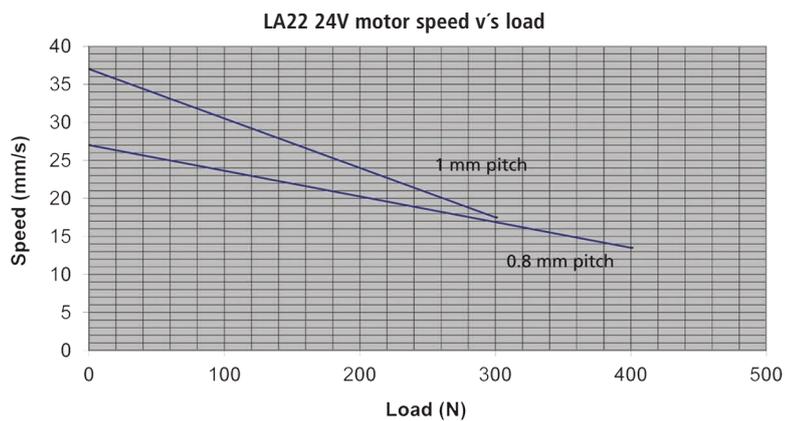
Type	Thrust max. Push (N)	Self-lock max. Push (N)	Thrust max. Pull (N)	Self-lock max. Pull (N)	Typical speed (mm/s) 0/full load*		Stroke length (mm)				Duty cycle (%)	Typical amp. at full load (A)	
					12V	24V	50	100	150	200		12V	24V
1 mm pitch	300	300	-	-	37	17.5	50	100	150	200	10	4.5	2.1
0,8 mm pitch	400	400	-	-	27	13.5	50	100	150	200	10	-	2.5
0,8 mm pitch	300	300	-	-	27	17	50	100	150	200	10	4.5	-

- LINAK control boxes are designed so that they will short-circuit the motor terminals (poles) of the actuator(s), when the actuator(s) are not running. This solution give the actuator(s) a higher self-locking ability. If the actuator(s) are not connected to a LINAK control box, the terminals of the motor must be short-circuited to give a higher selflocking ability.
- The above figures are with an ambient temperature of 20°C.
- There is no "pull" test data available at the present time, for more information please contact LINAK A/S.

Dimensions:

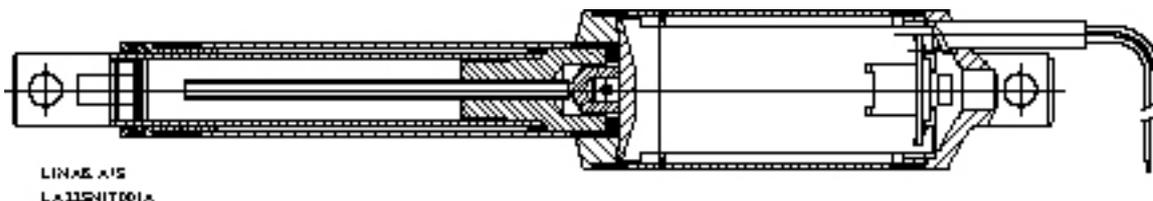
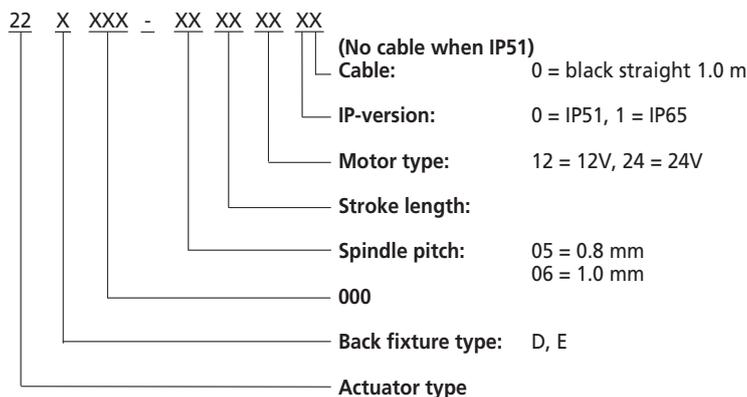


Graph:



LA22

Ordering example:



Accessories

- CS16: electric limit switch, trips out the current to the actuator in the end position
- Possibility of connecting a handset to the CS16
- LS/LSD: limit switch, to be mounted on the actuator

Other information

- LA22 dB (A) 50; measuring method DS/EN ISO 3743-1, actuator not loaded

THE CURRENT SUPPLY TO LINEAR ACTUATORS MUST BE CUT OFF IN CASE OF OVERLOAD AND WHEN THE ACTUATORS REACH END POSITION.

Terms of use

The user is responsible for determining the suitability of LINAK products for specific application. LINAK takes great care in providing accurate and up-to-date information on its products. However, due to continuous development in order to improve its products, LINAK products are subject to frequent modifications and changes without prior notice. Therefore, LINAK cannot guarantee the correct and actual status of said information on its products. While LINAK uses its best efforts to fulfill orders, LINAK cannot, for the same reasons as mentioned above, guarantee the availability of any particular product. Therefore, LINAK reserves the right to discontinue the sale of any product displayed on its website or listed in its catalogues or other written material drawn up by LINAK. All sales are subject to the Standard Terms of Sale and Delivery for LINAK. For a copy hereof, please contact LINAK.

Referencias de interés

- ¹Anderson, John David. *Fundamentals of Aerodynamics*. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2010. 5th ed.
- ²Schmidt, David K.. *Modern Flight Dynamics*. New York: McGraw-Hill, 2012.
- ³Macián Martínez, Vicente. *Fundamentos de ingeniería del mantenimiento*. Valencia: Editorial UPV, 2003 2011.
- ⁴Kalpakjian, Serope / Schmid, Steven R.. *Manufactura, ingeniería y tecnología* . Mexico: Pearson Education,2008. 5ª ed.
- ⁵Munford, Paul / Normand, Paul. *Mastering Autodesk Inventor 2016 and Autodesk Inventor LT 2016 [Recurso electrónico-En línea]*. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons, Inc., 2016.2016.
- ⁶Ramos Mateos, Jorge. *Design, implemantion and calibration of a three-component Balance for a novel distributed propulsion concept*. Von Karman Institute for fluid dynamics.