

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

Profesor Patrocinante:  
Frank Tinapp Dautzenberg.

Profesor Patrocinante:  
Emilio Dufeu Delarze.

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICION EN EL TUNEL DE VIENTO  
PARA LA OBTENCION DE CARGAS AERODINAMICAS EN SEIS  
COMPONENTES.**

**MARIO ANTONIO YAÑEZ PAREDES**

Informe de Memoria de Título  
Para optar al título de

Ingeniero Civil Mecánico

Concepción, Marzo del 2008.

## SUMARIO.

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción se encuentra en la actualidad desarrollando un proyecto de instalación y puesta en marcha de un túnel de viento subsónico para el laboratorio de aerodinámica.

El túnel de viento es una instalación experimental que sirve para estudiar cómo actúa el viento al incidir sobre objetos de distinta naturaleza. Uno de estos estudios (ensayos) permite predecir las fuerzas generadas cuando estos objetos se ubican y mueven en la zona de pruebas. Dichas cargas aerodinámicas (fuerzas y momentos) son medidas por medio de un instrumento denominado *balanza aerodinámica* cuya selección, establecimiento de condiciones de operación y el diseño de un sistema mecánico compatible a su funcionamiento son el principal propósito de este trabajo.

Previo al establecimiento del sistema de balanza aerodinámica apropiado, es necesario establecer un exhaustivo análisis de las cargas máximas en modelos de prueba de interés. En consecuencia, se analizó un perfil de ala de la serie 6 de NACA, y 2 modelos de aviones subsónicos Cessna 177 y GIANT (modelo de avión del laboratorio). Para la determinación de los coeficientes se empleó una aplicación freeware llamada *Javafoil*, que opera en ambiente Java™. Se obtuvo las cargas máximas para 2 tipos de comportamiento o funcionamiento de la balanza como sistema de medición. El primero *Balanza de pared* en la actitud vertical y el segundo *balanza sting* en la actitud horizontal, alcanzando cargas del orden de 2000 N en sustentación, 400 N en arrastre y 80 Nm de momento de cabeceo para perfiles de ala dispuestos en actitud vertical y por otro lado, cargas desde 1400 N en sustentación, 350 N en arrastre, 200 N en carga lateral, 110 Nm en momento de cabeceo, 150 Nm momento de alabeo y 20 Nm en momento de guiñada para modelos dispuestos en actitud horizontal.

Dos tipos de balanzas aerodinámicas constituyen las principales opciones de diseño, siendo éstas una balanza externa y una balanza interna. Se opta finalmente por una balanza interna de strain gages por una serie de ventajas discutidas ampliamente en el capítulo 3 y se acuerda con el fabricante las condiciones operativas de ésta. Sus dimensiones nominales son 35 mm de diámetro y una longitud de 300mm con extremos ahusados. En la zona de pruebas para los ensayos, se definió una plataforma circular giratoria o tornamesa de 1,5 m de diámetro donde ésta tiene en cuenta la variación del ángulo de guiñada. (Ángulo dado por el giro del eje normal a la tornamesa). Para la variación del ángulo de cabeceo se ha empleado un sistema actuador lineal de tornillo de bolas. Y para el movimiento de alabeo se emplea un servomotor- reductor con acoplamiento directo al soporte *sting* del modelo. Este método posee ventajas comparativas respecto de otros sistemas esto es discutido en el capítulo 4.

El movimiento del modelo en la zona de pruebas es controlado con gran exactitud y precisión, considerando para el actuador lineal una repetibilidad de  $\pm 0.15$  mm y exactitud de  $\pm 0.2$  mm en una carrera de 338 mm asegurando, en conjunto con la geometría de la instalación y un servomotor con encoder de 1000 líneas por revolución, una resolución angular de  $0,1^\circ$  para el movimiento de cabeceo. Análogamente, las restantes componentes angulares de movimiento, alabeo y guiñada también tendrán una resolución de  $0,1^\circ$  en base a la selección del servomotor y encoder respectivo adecuado. Para dar satisfacción a este requerimiento, se selecciona un equipamiento electrónico que brinda un sistema de control de loop cerrado o control con realimentación de señal (feedback) completamente programable para el correcto posicionamiento del modelo. Esto se discute en detalle en el capítulo 7.

Por medio de EES™ se construyen programas para poder editar eficientemente el diseño de los principales elementos mecánicos y/o selección de los servomotores y ciclos de trabajo, permitiendo modificar las variables para discusiones posteriores.

El análisis de componentes críticos, del sistema mecánico diseñado para la balanza aerodinámica, se realiza mediante el módulo GPS de elementos finitos de CATIA V5™, brindando parte de la justificación mecánica estructural del sistema propuesto; en este sentido, se determinó que las dos opciones discutidas de soporte para el modelo, cumplen los requerimientos de carga satisfactoriamente de acuerdo a la teoría de falla estática de Von Mises. Finalmente se propone un modelo diseñado y ensamblado en 3D en CATIA V5™ para el sistema mecánico que brinda adecuado funcionamiento.

---

## INDICE GENERAL

---

<b>Nomenclatura</b> .....	i
<b>Introducción</b> .....	iv
<b>Objetivos generales</b> .....	iv
<b>Capítulo 1 Antecedentes principales para el túnel de viento</b> .....	1
1.1 Túnel de Viento características generales y parámetros principales. ....	1
1.1.1 Clasificación.....	1
1.1.2 Estructura del túnel de viento.....	1
1.1.3 Régimen de pruebas.....	2
1.1.4 Sección de prueba y calidad de flujo.....	2
1.1.5 Tamaño del modelo, efecto escala y efecto del número de Reynolds.....	3
1.1.6 Correcciones en el Túnel de viento.....	4
1.2 Cargas Aerodinámicas en el túnel de viento y ecuaciones de transferencia.....	5
1.2.1 Sistemas de referencias para el túnel de viento y modelo.....	5
1.2.2 Actitud del modelo.....	5
1.2.3 Ecuaciones de transferencia de momentos.....	7
<b>Capítulo 2 Sistemas de medición de fuerzas en túneles de viento</b> .....	8
2.1 Concepto de balanza de seis componentes. ....	8
2.2 Balanzas Externas. ....	9
2.2.1 Perspectiva general en balanzas de plataforma, yoke y piramidal. ....	9
2.2.2 Balanza de plataforma. ....	10
2.2.3 Balanza yoke. ....	11
2.2.4 Balanza piramidal. ....	11
2.3 Balanzas Internas. ....	12
2.3.1 Filosofía de diseño. ....	12
2.3.2 Uniones de Balanza.....	14
2.4 Balanzas aerodinámicas requerimientos y características.....	14
2.5 Análisis comparativo para las balanzas aerodinámicas. ....	15
2.6 Selección de un sistema de balanza.....	16
2.7 Principio de funcionamiento del equipamiento electrónico.....	17
2.8 Sistema de adquisición de datos.....	18

<b>Capítulo 3 Selección y características de diseño de un sistema mecánico compatible</b>	<b>19</b>
3.1 Sistemas probables de diseño.....	19
3.1.1 Sistema guía curvada para variación de ángulo de cabeceo. ....	19
3.1.2 Sistema servohidráulico para variación del ángulo de cabeceo. ....	20
3.1.3 Sistema actuador lineal para variación de ángulo de cabeceo.....	21
3.1.4 Sistemas para el movimiento del ángulo de alabeo. ....	23
3.1.5 Sistemas para el movimiento del ángulo de guiñada. ....	25
3.1.6 Análisis y determinación de una propuesta final. ....	26
<b>Capítulo 4 Verificación de cargas límite para el túnel de viento.....</b>	<b>29</b>
4.1 Establecimiento de cargas límite para el túnel y modelos de prueba de interés .....	29
4.1.1 Características del perfil NACA de interés.....	29
4.1.2 Forma de fijación al túnel.....	30
4.1.3 Cálculo de las fuerzas aerodinámicas máximas.....	30
4.2 Modelos de aviones subsónicos a escala.....	31
4.2.1 Avión Cessna 177 y Curva arrastre polar.....	31
4.2.2 Ubicación del modelo en el túnel.....	32
4.2.3 Cálculo de las cargas aerodinámicas máximas Cessna 177.....	33
4.3 Derivadas de control y determinación de los coeficientes de guiñada, alabeo y fuerza lateral.....	34
4.4 Verificación de la condición límite de cargas.....	34
<b>Capítulo 5 Presentación de la propuesta final.....</b>	<b>38</b>
5.1 Presentación de la propuesta.....	38
5.2 Determinación de componentes críticos.....	40
5.3 Posicionamiento del sistema en el interior de la cámara de ensayos.....	40
<b>Capítulo 6 Análisis estático y dimensionamiento de elementos críticos mediante el     metodo de elementos finitos.....</b>	<b>42</b>
6.1 Pieza N°1 Soporte horizontal.....	42
6.1.1 Geometría y modelo para el cilindro soporte del sting.....	42
6.1.2 Tipos de elementos y malla de discretización.....	42
6.1.3 Condiciones de borde.....	43
6.1.4 Post-procesado y resultados. ....	45
6.2 Pieza N°2 Soporte vertical. ....	48
6.2.1 Geometría y modelo para el perfil tubular soporte vertical de columna.....	48
6.2.2 Tipos de elementos y malla de discretización.....	49
6.2.3 Condiciones de borde.....	50
6.2.4 Post-procesado y resultados. ....	53

<b>Capítulo 7 Selección de equipamiento para el sistema propuesto.....</b>	<b>58</b>
7.1 Selección de servomotores.....	58
7.1.1 Movimiento de alabeo.....	58
7.1.2 Movimiento de cabeceo.....	61
7.1.3 Movimiento de guiñada (Tornamesa).....	61
7.2. Selección actuador lineal de tornillo de bolas.....	63
7.3 Selección de equipamiento para sistema de control de movimiento.....	64
7.4 Selección de balanza interna strain gages. ....	66
7.5 Estimación de costos. ....	69
<b>Capítulo 8 Conclusiones y observaciones finales.....</b>	<b>70</b>
<b>9 Referencias / Bibliografía.....</b>	<b>72</b>
<b>Anexo A Información complementaria.....</b>	<b>74</b>
A.1 Definiciones y conceptos preliminares. ....	74
A.1.1 Número de Reynolds y número de Mach.....	74
A.1.2 Fuerzas aerodinámicas y similitud de flujo.....	75
A.1.3 Características aerodinámicas importantes en perfiles de ala.....	77
1.3.1 Curva de sustentación.....	77
1.3.2 Curva de arrastre polar.....	78
1.3.3 Curva de momento de cabeceo.....	78
1.3.4 Arrastre para una configuración de avión completo.....	79
A.2 Definiciones geometría del ala.....	81
A.3 Obtención de las curvas de capacidad del túnel de viento del laboratorio.....	83
A.4 Designación de perfiles NACA Series 4, 5 y 6. ....	84
A.5 Resultados en modelos de prueba.....	84
A.6 Definiciones para equipamiento electrónico y motriz. ....	86
A.7 Alternativas de soporte de modelos en balanza interna.....	87
A.8 Propuesta acordada con Aerotech e información adicional del DSCU y adquisición de datos.....	87
A.9 Montaje e instalación del sistema. ....	88
A.10 Estimación de costos instrumentación y fabricación.....	91
<b>Anexo B. Memoria de cálculo principales elementos del diseño mecánico propuesto..</b>	
B.1 Diseño de unión apernada soporte balanza actitud vertical.....	96
B.2 Diseño del perfil tubular cuadrado soporte lateral sting vertical. ....	97
B.3 Diseño del perfil tubular cuadrado que soporta el actuador lineal. ....	98
B.4 Reacciones soporte cilíndrico del sting horizontal. ....	98
B.5 Selección de rodamientos.....	99
B.6 Reacciones horquilla soporte vertical.....	102
B.7 Estimación del torque e inercias para la actitud de guiñada. ....	103
B.8 Selección del actuador lineal de tornillo de bolas. ....	105

<b>Anexo C. Antecedentes técnicos y dimensionales de unidades del sistema propuesto.</b>	127
C.1 Especificaciones motor Parker serie J.....	127
C.2 Utilidad de Selección reductor planetario de engranajes Neugart.....	128
C.3 Características técnicas reductor PLS HP SERIES.....	128
C.4 Características del actuador ET SERIES.....	129
C.5 Especificaciones para el sistema de freno.....	129
C.6 Plano de conjunto N°01.....	[-]
C.7 Plano de conjunto N°02.....	[-]
C.8 Plano de conjunto subensamblaje N°02.....	[-]