



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA BALANZA AERODINÁMICA  
PARA EL TÚNEL DE VIENTO SUBSÓNICO DE CICLO ABIERTO DEL  
LMFT DE LA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL PARA MEDICIÓN  
DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER EN MECATRÓNICA Y ROBÓTICA**

**DENNYS RAFAEL DAQUILEMA GUAMBO**

[dennys.daquilema@epn.edu.ec](mailto:dennys.daquilema@epn.edu.ec)

**DIRECTOR: ING. VÍCTOR HUGO HIDALGO., DSc.**

[victor.hidalgo@epn.edu.ec](mailto:victor.hidalgo@epn.edu.ec)

**CODIRECTOR: ING. ESTEBAN ALEJANDRO VALENCIA TORRES, Ph.D.**

[esteban.valencia@epn.edu.ec](mailto:esteban.valencia@epn.edu.ec)

**Quito, febrero, 2020**

## DECLARACIÓN

Yo, Dennys Rafael Daquilema Guambo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

-----  
Ing. Dennys Daquilema

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Dennys Rafael Daquilema Guambo bajo mi supervisión.

---

Ing. Víctor Hugo Hidalgo, DSc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Esteban Valencia Torres, Ph.D

**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de tesis y toda mi carrera estudiantil a Dios, quien ha estado en todos los momentos buenos y malos de mi vida, brindándome fuerzas para superar las vicisitudes que se han venido presentando a lo largo de esta magnífica experiencia universitaria. Todo mi sacrificio y dedicación depositados en mi vida estudiantil y en el presente, se las dedico a mis padres José Miguel que aunque no se encuentre conmigo físicamente, desde el cielo siempre me brinda su cuidado, y a mi madre Luz Imelda que con su valentía, amor incondicional y ejemplo han sabido guiar mi vida y a quien le debo todo. A mi hermano Geovanny que siempre ha sabido brindarme su cariño.

**Dennys Rafael Daquilema Guambo**

## **AGRADECIMIENTO**

El más sincero agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional, en especial a la Facultad de Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una especialización y ser entes que beneficien a la sociedad. A los Doctores Víctor Hidalgo y Esteban Valencia quienes sin interés alguno han sido una gran guía durante el desarrollo de este trabajo de titulación.

**Dennys Rafael Daquilema Guambo**

# ÍNDICE

1.	MARCO TEÓRICO.....	3
1.1.	Coefficiente de sustentación y arrastre. ....	3
1.2.	Túnel de Viento .....	4
1.2.1.	Túnel de Viento de la Escuela Politécnica Nacional .....	5
1.2.2.	Estado Físico y Funcional del Túnel de Viento.....	5
1.3.	Balanzas Aerodinámicas.....	6
1.3.1.	Balanza externa de plataforma .....	6
1.3.2.	Balanza aerodinámica de tres componentes DAS AFA44 .....	7
1.3.3.	Balanza aerodinámica robusta en un túnel de viento WINGSUIT. ....	7
1.3.4.	Diseño de una balanza aerodinámica por João Tiago Fernandes.....	8
1.3.5.	Diseño de una balanza por José Sánchez. ....	9
1.4.	Fuerzas Aerodinámicas. ....	9
1.4.1.	Fuerza de arrastre o resistencia al avance.....	10
1.4.2.	Fuerza de sustentación. ....	11
1.5.	Celdas de Carga (Células de Carga) .....	11
1.5.1.	Célula de carga de compresión .....	12
1.5.2.	Célula de carga de viga en S. ....	12
1.5.3.	Criterios de selección de celdas de carga .....	13
1.6.	Sistemas de Acondicionamiento de Señal (Amplificadores Operacionales).....	13
1.7.	Sistemas de Adquisición de Datos .....	14
1.7.1.	Arduino.....	14
1.7.2.	Tarjetas National Instruments .....	15
2.	METODOLOGÍA.....	16
2.1.	Estrategia metodológica. ....	16
2.2.	Diseño del Prototipo de Balanza Aerodinámica y Selección de Componentes. ....	18

2.2.1.	Sistema de adquisición de datos. ....	18
2.2.1.1.	Sensores. ....	18
2.2.1.2.	Tarjetas de adquisición de datos. ....	20
2.2.1.3.	Circuito de amplificación y acople de impedancias.....	23
2.2.1.4.	Interfaz de usuario (GUI).....	24
2.2.2.	Diseño y Construcción de la Balanza Aerodinámica.....	25
2.3.	Procedimiento de los Ensayos. ....	32
2.4.	Análisis de incertidumbre.....	33
3.	RESULTADOS y discusión .....	35
3.1.	Simulaciones estructurales y CFD .....	35
3.2.	Pruebas al vacío .....	39
3.3.	Cálculo de Incertidumbre.....	41
3.4.	Verificación del desempeño del modelo construido.....	41
4.	Conclusiones .....	47
4.1.	Conclusiones.....	47
4.2.	Trabajos Futuros.....	48
	Referencias Bibliográficas .....	48
	Anexos.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Balanza aerodinámica externa de plataforma.....	7
<b>Figura 1.2.</b> Balanza DAS AFA44.....	7
<b>Figura 1.3.</b> Balanza aerodinámica diseñada.....	8
<b>Figura 1.4.</b> Balanza aerodinámica.....	8
<b>Figura 1.5.</b> Diseño conceptual Von Karman Institute for Fluid Dynamics.....	9
<b>Figura 1.6.</b> Fuerzas Aerodinámicas.....	9
<b>Figura 1.7.</b> Movimiento del viento según la forma del cuerpo.....	10
<b>Figura 1.8.</b> Fuerza de Sustentación.....	11
<b>Figura 1.9.</b> Celdas universales de carga en miniatura con perno doble.....	12
<b>Figura 1.10.</b> Células de carga métrica S Beam de alto rendimiento.....	12
<b>Figura 1.11.</b> Diagrama a bloques simplificado de un amplificador operacional.....	14
<b>Figura 1.12.</b> Arduino uno.....	15
<b>Figura 1.13.</b> Tarjeta USB 6009.....	15
<b>Figura 2.1.</b> Metodología de desarrollo para la obtención de fuerzas aerodinámicas.....	16
<b>Figura 2.2.</b> Diagrama de operaciones.....	17
<b>Figura 2.3.</b> Celda de Carga OMEGA LCM703-150.....	20
<b>Figura 2.4.</b> Dimensiones Celda de Carga OMEGA.....	20
<b>Figura 2.5.</b> Circuito de amplificación y acople de impedancias.....	23
<b>Figura 2.6.</b> Diseño de tarjeta 3D.....	24
<b>Figura 2.7.</b> Software de Adquisición de Datos.....	25
<b>Figura 2.8.</b> Boceto de mecanismo para balanza aerodinámico.....	26
<b>Figura 2.9.</b> Construcción de la balanza y montaje de los elementos.....	28
<b>Figura 2.10.</b> Construcción del mecanismo para la obtención de CL.....	29
<b>Figura 2.11.</b> Perfil Simétrico NACA 0012.....	30
<b>Figura 2.12.</b> Perfil NACA 0012 y acoples construidos.....	30
<b>Figura 2.13.</b> Prototipo de balanza aerodinámica.....	31
<b>Figura 2.14.</b> Balanza aerodinámica en vista lateral derecha.....	32
<b>Figura 2.15.</b> Balanza Aerodinámica en vista isométrica.....	32
<b>Figura 2.16.</b> Diagrama de procesos.....	33
<b>Figura 3.1.</b> Simulación de la deformación total.....	35

<b>Figura 3.2.</b> Esfuerzos máximos generados .....	36
<b>Figura 3.3.</b> Coeficiente de seguridad .....	36
<b>Figura 3.4.</b> Líneas de flujo en vista lateral .....	37
<b>Figura 3.5.</b> Líneas de flujo en vista frontal .....	37
<b>Figura 3.6.</b> Presencia de turbulencias en líneas de flujo de aire.....	38
<b>Figura 3.7.</b> Turbulencia en elemento de prueba.....	38
<b>Figura 3.8.</b> Valores de voltaje y masa de la celda 1 .....	40
<b>Figura 3.9.</b> Valores de voltaje y masa de la celda 2 .....	40
<b>Figura 3.10.</b> Diagrama de bloques en LabView.....	41
<b>Figura 3.11.</b> Visualización de valores de coeficientes aerodinámicos .....	42
<b>Figura 3.12.</b> Coeficiente de Arrastre. ....	43
<b>Figura 3.13.</b> Coeficiente de Sustentación. ....	44
<b>Figura 3.14.</b> Coeficientes de sustentación experimental, esperado y modificado .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Evaluación cualitativa del estado físico y funcional del túnel de viento. ....	5
<b>Tabla 2.1:</b> Descripción cualitativa y cuantitativa de un Arduino UNO .....	21
<b>Tabla 2.2:</b> Descripción cualitativa y cuantitativa de una DAQ NI-USB 6009.....	22
<b>Tabla 2.3.</b> Comparación de ventajas de tarjetas de adquisición .....	22
<b>Tabla 2.4.</b> Análisis cuantitativo y cualitativo del acero al carbono .....	26
<b>Tabla 2.5.</b> Análisis cuantitativo y cualitativo del aluminio comercial .....	27
<b>Tabla 2.6.</b> Análisis cuantitativo y cualitativo del acero inoxidable .....	27
<b>Tabla 3.1.</b> Valores de voltaje y masa .....	39
<b>Tabla 3.2.</b> Incertidumbres del prototipo de balanza .....	41
<b>Tabla 3.3.</b> Valores experimentales, esperados y porcentaje de error .....	43

## RESUMEN

El presente proyecto de titulación tuvo como objetivo diseñar y construir un prototipo de balanza aerodinámica, que permitió la medición de fuerzas aerodinámicas mediante la obtención de los coeficientes de arrastre y sustentación, que se generan en los perfiles sumergidos en un fluido. Para poder determinar la efectividad del prototipo se realizaron ensayos en un perfil aerodinámico NACA 0012 de cuerda 15 cm, se tomaron 10 muestras en cada punto de interés que se generan por la variación del ángulo de ataque que va de -4 a 20 grados; dichos valores fueron comparados con los emitidos por el reporte número 460 de la NACA que además nos permitió determinar el valor de incertidumbre presente en el sistema que tiene un valor de 0.035, y un porcentaje de error máximo en coeficiente de arrastre de 75% y del 95% en el coeficiente de sustentación debido a las vibraciones presentes en el túnel de viento durante su funcionamiento y la incorrecta ubicación del mismo, que provoca una recirculación del aire que influye a la zona de pruebas.

**Palabras Clave:** Balanza aerodinámica, Coeficiente de Arrastre ( $C_D$ ), Coeficiente de Sustentación ( $C_L$ ).

## **ABSTRACT**

The objective of this titling project was to design and build a prototype aerodynamic balance, which allowed the measurement of aerodynamic forces by obtaining drag and lift coefficients, which are generated in the profiles submerged in a fluid. In order to, determine the effectiveness of the prototype, tests were carried out on an aerodynamic profile NACA 0012 of 15 cm rope, 10 samples were taken at each point of interest that are generated by the variation of the angle of attack ranging from -4 to 20 degrees. These values were compared with those issued by the NACA report number 460, which also allowed us to determine the uncertainty value present in the system that has a value of 0.035, and a maximum error percentage in drag coefficient of 75% and 95% in the lift coefficient due to the vibrations present in the wind tunnel during its operation and its incorrect location, which causes a recirculation of the air that influences the test area.

**Keywords:** Aerodynamic balance, Drag coefficient (CD), Lift coefficient (CL).

# INTRODUCCIÓN

La Escuela Politécnica Nacional (EPN) cuenta con un Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Turbo Maquinaria (LMFT), el cual es utilizado por estudiantes y docentes para la realización de proyectos investigativos. Siendo el estudio aerodinámico uno de los principales campos dentro de la ciencia y tecnología es necesario que todo laboratorio cuente con un túnel de viento entre sus componentes esenciales.

Este elemento es una herramienta importante que posibilita la determinación de valores aerodinámicos que, conjugados con datos de velocidad, temperatura, fuerzas y otras características del flujo de aire, se logra establecer y verificar teorías aerodinámicas de diversos elementos de prueba (álabes, perfiles y modelos a escala).

El túnel de viento existente en el laboratorio (LMFT) ha sido objeto de varios trabajos de titulación, una de ellas aborda la implementación de dispositivos de medición y adquisición de datos para la determinación del coeficiente de presión ( $C_p$ ) que produce un fluido a un elemento determinado.

El actual proyecto de titulación busca potenciar los estudios que se pueden realizar en un túnel de viento, mediante un dispositivo de medición de fuerzas (balanza); La realización de este proyecto de investigación es fundamental ya que un fluido al estar en contacto con un elemento sólido produce fuerzas aerodinámicas para lo cual es necesario la determinación de sus coeficientes como son: sustentación L (lift) y arrastre D (drag) y son necesarios para la determinación aerodinámica de un elemento.

## **Objetivo general**

Diseñar y construir una balanza aerodinámica que permita medir las fuerzas de arrastre y sustentación en el túnel de viento subsónico de ciclo abierto del laboratorio de fluidos y turbo maquinaria de la Escuela Politécnica Nacional.

## **Objetivos específicos**

- Realizar una recopilación bibliográfica del estado del arte de los sistemas de instrumentación utilizados en los túneles de viento.
- Diseñar un modelo de balanza aerodinámica basado en el estado del arte que permita la medición de las fuerzas de arrastre y sustentación.

- Seleccionar los instrumentos y elementos necesarios para la medición de las fuerzas aerodinámicas de arrastre y sustentación basados en los valores máximos teóricos.
- Implementar los instrumentos, y construir los elementos necesarios en el túnel de viento.
- Verificar el correcto desempeño del sistema de instrumentación mediante la comparación y determinación del porcentaje de error entre los valores obtenidos con los valores tabulados de un perfil aerodinámico específico detallados en el reporte 460 de la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).

# 1. MARCO TEÓRICO

Este apartado trata acerca de la revisión bibliográfica utilizada para el desarrollo del estado de arte dentro del estudio teórico y experimental de las balanzas aerodinámicas, en las cuales se mencionan el diseño y construcción de prototipos utilizados para la obtención de las fuerzas aerodinámicas producidas en un alabe o perfil aerodinámico, tomando consideraciones como velocidad del aire y condiciones medio ambientales del lugar de pruebas, se realiza un análisis comparativo de cada uno de los elementos a ser utilizados para la fabricación de la misma. Posteriormente se realiza un análisis de los datos entregados por el informe 460 de la NACA para poder relacionarlas con los resultados obtenidos por el prototipo construido y de esta manera determinar el porcentaje de error y el valor de incertidumbre en el que se desarrolla el prototipo.

## 1.1. Coeficiente de sustentación y arrastre.

Un alabe o cuerpo en reposo sometido a un fluido y a cambios en su posición angular soporta cargas o fuerzas aerodinámicas (arrastre y sustentación) por lo que su conocimiento es fundamental para el desarrollo de aplicaciones aerodinámicas. Estas cargas dependen de distintos factores sean estos constantes o variables como son la velocidad, temperatura, la geometría y acabado superficial del sujeto de pruebas, entre otras.

Un cuerpo sumergido en un fluido experimenta movimiento, el mismo que está relacionado con las componentes de las fuerzas dinámicas de arrastre y de sustentación resultante, ejercida por el fluido sobre el cuerpo. La fuerza dinámica de arrastre también conocida como la resistencia al movimiento, es la componente de la fuerza resultante, en la dirección del flujo relativo producido, y la sustentación es la componente normal a esa dirección. (Fergusson Harleman & Wallace Daily, 1975)

Se denota que los coeficientes de las fuerzas de arrastre y sustentación  $C_P$  y  $C_L$ , son adimensionales.

En las ecuaciones 1-1 y 1-2 se muestran: Coeficiente de arrastre y sustentación, mientras que en la ecuación 1-3 se muestra la presión dinámica, necesaria para la obtención de los coeficientes antes mencionados.

Coeficiente de sustentación:

$$C_L = \frac{L}{qS} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Coeficiente de arrastre:

$$C_D = \frac{D}{qS} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Presión Dinámica:

$$q = \frac{1}{2}\rho V^2 \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Donde:

L: Fuerza aerodinámica de Sustentación.

D: Fuerza aerodinámica de Arrastre

$\rho$ = Densidad (masa por unidad de volumen)  $\left(1,225 \frac{Kg}{m^3}\right)$ .

V= Velocidad real del aire.

S= Área.

## 1.2. Túnel de Viento

También denominado túnel aerodinámico el mismo que es un instrumento para estudios e investigaciones experimentales dedicado para determinar los efectos producidos en objetos o cuerpos solidos por la interacción del aire hacia ellos. (Muñoz Mejiás, 2012)

Dentro de un túnel de viento el objeto de estudio (perfil aerodinámico) permanece estacionario mientras el flujo de gas (aire) pasa alrededor de la periferia de él. Mediante la acción de las turbinas o ventiladores a través de un conducto equipado con una ventana y otros aparatos en los que los modelos o formas geométricas se montan para el estudio. Además, se debe tener en cuenta el número de Reynolds y el número de Mach para su régimen de funcionamiento. (Muñoz Mejiás, 2012)

Los trabajos experimentales y de investigación en túneles de viento resulta ser el método más rápido, económico y preciso para la realización de estudios aerodinámicos; ofrecen capacidades de trabajo con modelos a escala en fases iniciales de desarrollo, representan enteramente la complejidad del comportamiento de un fluido real, y proporcionan grandes

cantidades de información fiable que sirve de base para diferentes decisiones de diseño. (Muñoz Mejiás, 2012)

### 1.2.1. Túnel de Viento de la Escuela Politécnica Nacional

La Escuela Politécnica Nacional dentro del Laboratorio de Mecánica de Fluidos y Turbo Maquinaria (LMFT) posee un túnel de viento modelo T677 construido por la empresa PLINT & PARTNERS LTDA. Mediante el uso de un anemómetro KESTREL puesto en funcionamiento se determinó que el fluido (Aire) dentro del túnel de viento puede alcanzar una velocidad de 39,2 m/s cuando sus dos ventiladores se encuentran en funcionamiento.

El túnel de viento consta de un cono de contracción, dos zonas de pruebas un cono difusor además posee un regulador de caudal de flujo y un silenciador que se encarga de la reducción del ruido excesivo producido por los ventiladores.

### 1.2.2. Estado Físico y Funcional del Túnel de Viento.

Se determina el estado físico y funcional del túnel de viento dando una calificación cualitativa que se detalla a continuación.

E=Excelente      MB= Muy Bueno      B= Bueno      R= Regular      M=Malo

**Tabla 1.1:** Evaluación cualitativa del estado físico y funcional del túnel de viento.

Túnel de Viento T677					
VARIABLES	E	MB	B	R	M
Estado Físico					
Bancada			X		
Sujeción de los implementos de medición					X
Conexiones eléctricas			X		
Ventiladores		X			
Cámara de pruebas			X		
Posición del túnel de viento					X

(Fuente: Autor)

En la tabla 1.1 se muestra una evaluación cualitativa del túnel de viento. Aunque para definir un correcto desempeño de los ventiladores sería propicio realizarles ensayos que midan su rendimiento tanto mecánico como eléctrico, el hecho de que durante todo el periodo de pruebas no hayan presentado problema permitió otorgarles una calificación de muy buenos.

Por el ámbito de las conexiones eléctricas tienen una evaluación buena ya que el cableado está sobre las paredes y no existen elementos que protejan las conexiones, constituyéndose un riesgo eléctrico. Las cámaras de prueba poseen orificios por los cuales se producen pérdida de flujo de aire, además que, el acrílico que la constituye presenta cristalización y no permite una buena visualización del ensayo. Los dos mayores problemas encontrados en el túnel son la alta vibración durante su funcionamiento, y la incorrecta posición del túnel. La vibración es producida por un ineficiente anclaje que no se encuentra colocado en su totalidad, pues al momento que el túnel fue cambiado de lugar, no se colocó la base que ancla el difusor al piso debido a una diferencia dimensional entre el anclaje y el espacio disponible en el nuevo laboratorio, es así que, durante su funcionamiento la vibración genera movimientos relativos que incluso afloja juntas pernadas e imposibilita lectura de algunos elementos de medición colocados en el túnel. El segundo problema es el incorrecto lugar que fue asignado para el túnel de viento, fabricantes recomiendan que el túnel cuente con dos metros libres de obstáculos a la entrada del flujo y de 4 metros a la salida, cosa que no cumple el túnel de la facultad pues en ambos lugares presenta obstáculo que generan recirculación de fluido, contaminando las lecturas de los ensayos que se realizan en el mismo.

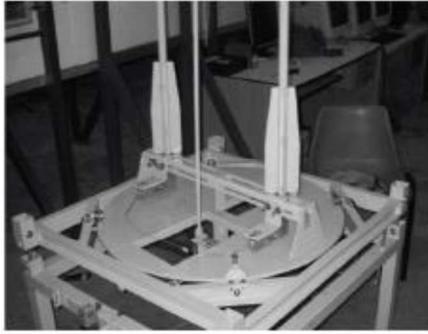
### **1.3. Balanzas Aerodinámicas**

En una simple forma, una balanza aerodinámica es un implemento usado directamente para medir fuerzas y torques actuantes en un modelo que está siendo examinado en un túnel de viento. (Pinheiro Fernandes, 2018)

#### **1.3.1. Balanza externa de plataforma**

Esta balanza es utilizada para el estudio de aviones a escala, posee tres soportes: dos de ellos sostienen el elemento sujeto a estudio en las semi-alas y el tercer soporte sostiene el elemento desde su parte posterior (fuselaje); el soporte posterior tiene la característica de ser móvil ya que es necesario realizar cambios del ángulo de ataque durante las pruebas experimentales.

La base de la balanza es un disco giratorio que brinda la posibilidad de medir tres fuerzas y tres momentos. (Aguirre, Astiz, Ferrandez, & Meronluc, 2016)



**Figura 1.1.** Balanza aerodinámica externa de plataforma.  
(Fuente: (Aguirre, Astiz, Ferrandez, & Meronluc, 2016))

### **1.3.2. Balanza aerodinámica de tres componentes DAS AFA44**

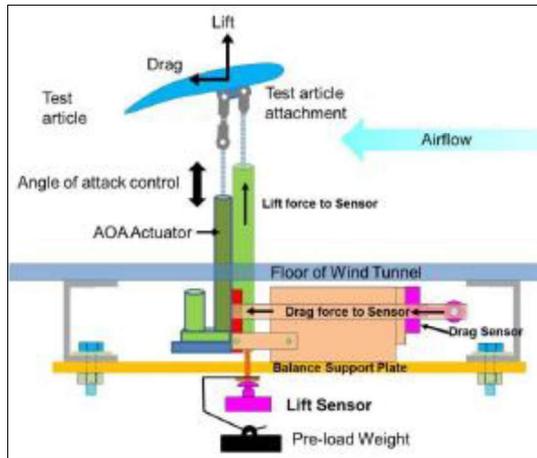
Balanza diseñada por la empresa TECQUIPMENT, está diseñada para ser adaptada en un túnel de viento DAS AFI300T y de similares construcciones. La balanza aerodinámica AFA44 es alimentada con un voltaje de 100 a 240 v de corriente alterna y tiene una capacidad de medir una fuerza de sustentación máxima de 100 N y de arrastre de 50 N y además de un momento de cabeceo de 2,5 Nm. (TECQUIPMENT LTD.)



**Figura 1.2.** Balanza DAS AFA44  
(Fuente: (TECQUIPMENT LTD.))

### **1.3.3. Balanza aerodinámica robusta en un túnel de viento WINGSUIT.**

Desarrollado por Timothy Allen Sestak, es una balanza construida en la cual, debido a las limitaciones, simplificaciones, presupuesto y otras restricciones hacen que las fuerzas de sustentación y arrastre no se aíslan entre ellas. El mecanismo en el lugar que estan acopladas las celdas de cargas de arrastre y sustentación a menudo da como resultado condiciones en la que las fuerzas aerodinámicas producen cambios en las medidas de carga. (Sestak, 2015)



**Figura 1.3.** Balanza aerodinámica diseñada  
(Fuente: (Sestak, 2015))

#### 1.3.4. Diseño de una balanza aerodinámica por João Tiago Fernandes.

El dimensionamiento de la balanza tuvo como base la posibilidad de ser probada en aviones y modelos de media ala ensamblados en la sección de prueba, utilizando un software de simulación, que proporcionó el rango de carga máximo al que se someterá la balanza para cada caso. (Pinheiro Fernandes J. T., 2018)

El modelo ha sido seleccionado utilizando un conjunto de criterios comparativos y un proceso jerárquico analítico que permitió definir y escoger que la balanza de plataforma externa es la más adecuada. (Pinheiro Fernandes J. T., 2018)



**Figura 1.4.** Balanza aerodinámica  
(Fuente: (Pinheiro Fernandes J. T., 2018))

### 1.3.5. Diseño de una balanza por José Sánchez.

La balanza aerodinámica fue construida por dos placas flotantes. La superior, llamada de distribución está unida a la bancada del túnel por dos articulaciones en unos de los laterales que le permiten el movimiento únicamente en dirección vertical. Esta placa está unida rígidamente a una placa inferior que actúa como referencia para las tres células de carga. Ya que la placa está unida a la bancada también está empotrada por su parte lateral delantera mediante una célula de carga que permite la obtención de las componentes horizontales, es decir fuerza de resistencia. (Sánchez López, 2017)

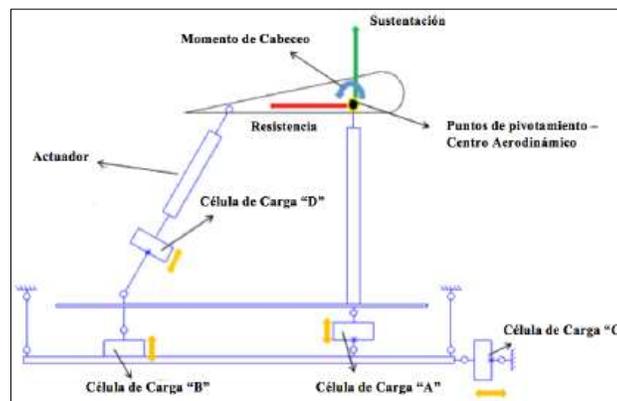


Figura 1.5. Diseño conceptual Von Karman Institute for Fluid Dynamics.  
(Fuente: (Sánchez López, 2017))

## 1.4. Fuerzas Aerodinámicas.

Todo cuerpo que actúa dentro de un fluido experimenta efectos por la interacción resultante de los mismos. Estos efectos se pueden denominar fuerzas y momentos. Ya sea en un avión, automóvil o una pelota, las fuerzas que experimentan son las mismas y se puede resumir en dos: resistencia al avance y sustentación. (Padilla Benítez, 2015)

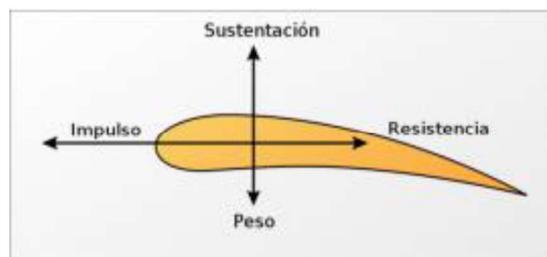


Figura 1.6. Fuerzas Aerodinámicas.  
(Fuente: (Colomar Lix, 2012))

En la Figura 1.6 el cuerpo está sometido a fuerzas en el plano cartesiano, se pueden observar los nombres de cada una de las fuerzas y están situadas según la acción que tiene cada una de ellas por influencia de la dirección del viento. (Padilla Benítez, 2015)

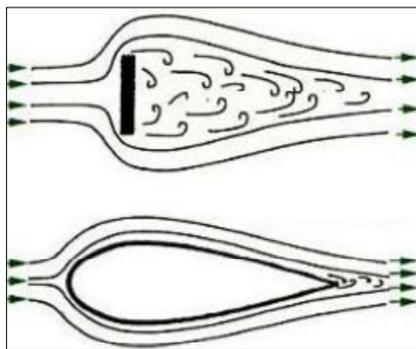
Por lo general para solucionar problemas aerodinámicos es necesario calcular varias propiedades del fluido, como son velocidad, presión, densidad y temperatura, en función del tiempo y de la posición del punto estudiado. (Padilla Benítez, 2015)

#### **1.4.1. Fuerza de arrastre o resistencia al avance.**

Se denomina resistencia al avance, (Padilla Benítez, 2015) a la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través de un fluido, y en particular a la componente de esa fuerza en la dirección de la velocidad relativa del cuerpo respecto del medio. (Ramírez Cruz & Conde Calderon, 2012)

La resistencia es siempre de sentido opuesto al de dicha velocidad, por lo que habitualmente se dice de ella que, de forma análoga a la de fricción, es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través de un fluido. (Ramírez Cruz & Conde Calderon, 2012) Por ejemplo, como lo hace un submarino en el interior del agua. (Padilla Benítez, 2015)

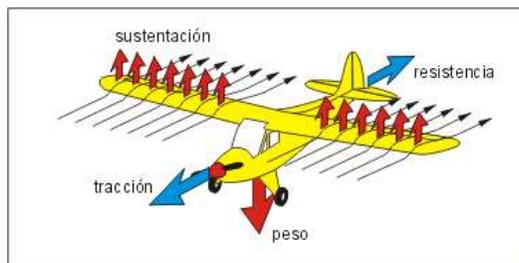
En la Figura 1.7 se visualiza los movimientos de las líneas de viento dependiendo de la forma de los cuerpos, al chocar el viento con una superficie plana las líneas de aire se rompen formando turbulencia, en cambio el otro cuerpo no rompe las líneas de aire, no crea turbulencia. (Padilla Benítez, 2015)



**Figura 1.7.** Movimiento del viento según la forma del cuerpo  
(Fuente: (Padilla Benítez, 2015))

### 1.4.2. Fuerza de sustentación.

Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido. Su dirección es perpendicular respecto a la velocidad del flujo de aire incidente. Esta se produce cuando el aire que circula por encima o debajo de un objeto pasa más lentamente y por lo tanto a mayor presión que el que fluye por encima, este efecto permite que el objeto venza la fuerza de la gravedad, y como su propio nombre indica, se sustente en dicho fluido e incluso se eleve aún más. (Padilla Benítez, 2015)



**Figura 1.8.** Fuerza de Sustentación  
(Fuente: (paosoler05, 2015))

De la Figura 1.8 (que hace una curva convexa) se llama "extrados", y la inferior (con curva cóncava) se llama "intrados". La parte más importante es el "extrados", que genera una cierta succión producida por el aire hacia arriba de toda el ala (mientras que el "intrados" puede ser recto). Gracias al uso de este principio las alas de los aviones pueden funcionar correctamente. (Padilla Benítez, 2015)

- **Densidad del aire.**

La densidad depende de varios factores, entre ellos la altura, dicho de esta manera a más altura menor densidad del aire, es decir que por cada metro cubico existe menos masa de aire, la densidad del aire a nivel del mar es  $1,3 \text{ Kg/m}^3$  y a 2.200 metros de altura vale  $1 \text{ Kg/m}^3$ . (Padilla Benítez, 2015)

### 1.5. Celdas de Carga (Células de Carga)

Es un dispositivo de medición formado por un miembro elástico y un transductor de desplazamiento capacitivo conectado al miembro elástico, de esta manera la desviación del mismo bajo carga, da como resultado una señal que indica una carga aplicada. El uso de transductores de desplazamiento capacitivo permite realizar mediciones precisas con una deflexión pequeña, permite utilizar elementos elásticos relativamente rígidos mecanizados en

metal sólido que tienen altas frecuencias de resonancia y tiempos de respuesta cortos, y da una respuesta confiable de alta sensibilidad relativamente libre de drift. (F. Wolfendale, 1986)

### 1.5.1. Célula de carga de compresión

Estas células con frecuencia tienen un diseño que consta de un botón integral. Está diseñada para ser colocada en espacios reducidos y para soportar grandes cargas, además de ser construida de acero inoxidable y extensómetros de alto rendimiento. (OMEGA, OMEGA, s.f.)

#### Célula de carga de compresión/tensión

Son utilizadas para medir fuerzas que pueden pasar de tensión a compresión o viceversa, Las células de carga poseen extremos roscados que facilitan la instalación, además de ser adecuados para uso de espacio limitado.



**Figura 1.9.** Celdas universales de carga en miniatura con perno doble.  
(Fuente: (OMEGA, Omega, s.f.))

### 1.5.2. Célula de carga de viga en S.

Estas células de carga toman su nombre por su forma parecida a la letra S. Se pueden aplicar para medición de niveles en tanques, tolvas y básculas para camión. (OMEGA, Omega, s.f.)



**Figura 1.10.** Células de carga métrica S Beam de alto rendimiento.  
(Fuente: (OMEGA, Omega, s.f.))

### **1.5.3. Criterios de selección de celdas de carga**

Con el objetivo de seleccionar la celda de carga más idónea para cualquier aplicación particular, se hace necesario primero identificar los valores de carga máxima al cual será sometido, dentro de este aspecto se destacan tres valores a considerar; el primer valor es la carga nominal de la celda, que es el valor de la fuerza máxima en la cual debe trabajar la celda, luego tenemos el valor máximo de sobrecarga, que indica el valor máximo que podrá soportar la celda sin dañarse pero que no deberá llegar en rangos normales de funcionamiento, y finalmente el valor último de sobrecarga que permite identificar el valor máximo donde la celda queda obsoleta. Aunque es lógico que la celda se seleccione bajo el criterio de la carga nominal, es importante considerar los otros dos aspectos que permitirán verificar la calidad y confiabilidad de la celda.

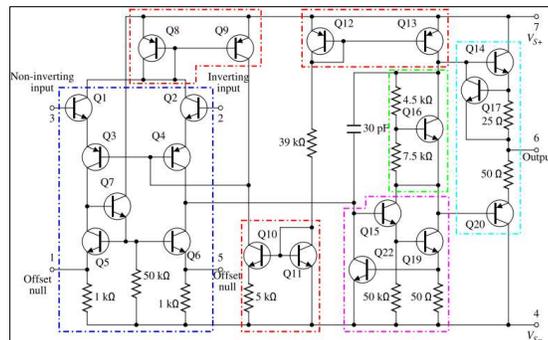
Otros aspectos a considerar es el tipo de carga que soporta, pues existen elementos para la medición de cargas solo de tracción, solo de compresión, o combinados. Además, se debe considerar el material constitutivo de la celda en base al medio en el cual se vaya a desenvolver, su capacidad de permanecer inmutable a cambios de temperatura, y sus valores de voltaje y amperaje de alimentación. Todos estos aspectos se conjugan y en base a las exigencias de cada aplicación se traducen a celdas más o menos económicas.

### **1.6. Sistemas de Acondicionamiento de Señal (Amplificadores Operacionales).**

Las señales proporcionadas por cualquier sensor se caracterizan por ser extremadamente pequeños, por lo cual es necesario realizar una amplificación de la misma que nos permita estudiarla y en especial nos permita muestrearla y poder visualizarla, es así que se hace necesario la utilización de circuitos de amplificación que pueden ser diseñados a partir de circuitos basados en transistores, o circuitos embebidos como son los amplificadores de instrumentación que se especializan en la amplificación de señales a partir de sensores, y que utilizan configuraciones de amplificadores operacionales que garantizan óptimos desempeños de amplificación.

Los amplificadores operacionales se diseñan mediante la utilización de diversas técnicas de fabricación. Inicialmente sólo fueron creados los transistores bipolares, en la actualidad se dispone de diversos tipos de dispositivos en los que se utilizan transistores de efecto de campo

dentro del amplificador operacional. Estos transistores de unión a la entrada consumen corrientes muy pequeñas y permiten la variación de los valores de tensión de entrada dentro de los límites de la fuente de alimentación. Los circuitos de salida poseen transistores MOS (metal-óxido-semiconductor) que permiten que esta varíe dentro de los límites de mili-volts respecto de la fuente de alimentación. (Coughlin & Driscoll, 1998)



**Figura 1.11.** Diagrama a bloques simplificado de un amplificador operacional. (Fuente: (Dominguez, 2010))

## 1.7. Sistemas de Adquisición de Datos

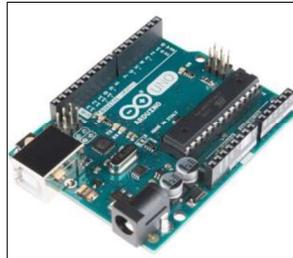
Los sistemas de adquisición de datos permiten detectar con un computador fenómenos eléctricos o físicos tales como voltaje, corriente, presión, etc. Aunque los sistemas de adquisición se constituyen desde los sensores hasta el computador, en este apartado se centrará al estudio de los elementos que permiten leer la señal proveniente del sistema de amplificación hasta convertirlo en datos que interpreta un computador. Es así que, dentro del análisis se abordará dos opciones de sistemas como son: el Arduino y la tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments.

### 1.7.1. Arduino

Una placa Arduino tiene como base un microcontrolador ATMEL, el mismo que es un circuito integrado para grabar instrucciones. Posee una interfaz de entrada que posibilita conectar una serie de diferentes tipos de periféricos (Cámaras, teclados, sensores) que nos permiten obtener imágenes, introducir datos u obtener datos. La plataforma Arduino (hardware + software) ofrece una serie de ventajas: (Torrente Artero, 2013)

Dentro de las principales ventajas del Arduino está su versatilidad de que exista un variado “ecosistema” de extensiones, tanto de variantes de placas no oficiales como de librerías software de terceros, que pueden adaptarse mejor a las necesidades concretas, así como son

fáciles de aprender y utilizar, a la vez que flexibles y completos. Además, están bien documentados, con ejemplos detallados y gran cantidad de proyectos publicados en diferentes formatos. (Torrente Artero, 2013)



**Figura 1.12.** Arduino uno  
(Fuente: (Arduino uno, 2019))

### 1.7.2. Tarjetas National Instruments

Las tarjetas national instruments son elementos especializados en la adquisición de datos mucho más precisos e incluso con aplicaciones específicas. Estas tarjetas cuentan con puertos tanto de ingreso como de salida de datos que pueden ser utilizados en forma simple o diferencial, cuentan con fuentes de voltaje y permite analizar señales digitales y analógicas. Existe un gran catálogo de tarjetas que van desde tarjetas especializadas en una sola variable física hasta tarjetas que permiten medir una considerable cantidad de variables. También cuentan con tarjetas para aplicaciones industriales y educativas que se diferencian en las prestaciones e interfaz que cada tarjeta proporciona, es importante indicar que dichas tarjetas pueden tener interfaz con cualquier software computacional, pero que se facilita cuando se lo vincula con el paquete computacional de la misma compañía (Labview).

La mayor dificultad de la utilización de estos dispositivos es su alto costo, que, aunque cuentan con tarjetas estudiantiles de bajo presupuesto, aún siguen siendo más onerosas con respecto a otras opciones comerciales.

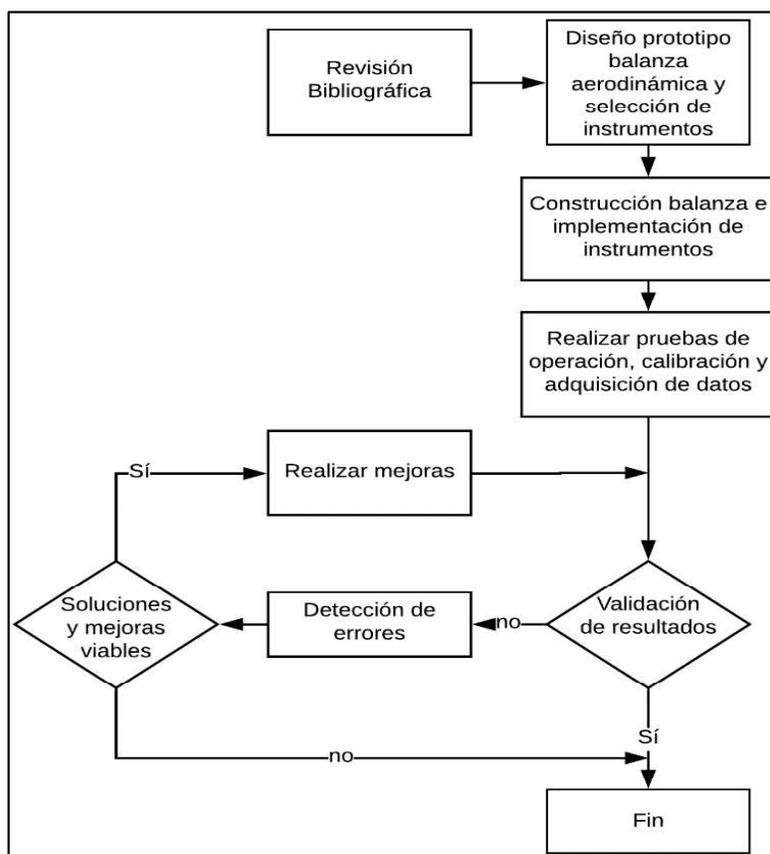


**Figura 1.13.** Tarjeta USB 6009  
(Fuente: (Instruments, National Instruments, 2019))

## 2. METODOLOGÍA.

En esta sección se detalla la metodología utilizada para el diseño y construcción del prototipo de balanza, utilizada para el estudio de fuerzas aerodinámicas producidas en un alabe dentro de un túnel de viento y posteriormente la metodología utilizada para la obtención y determinación del porcentaje de error producida por el prototipo.

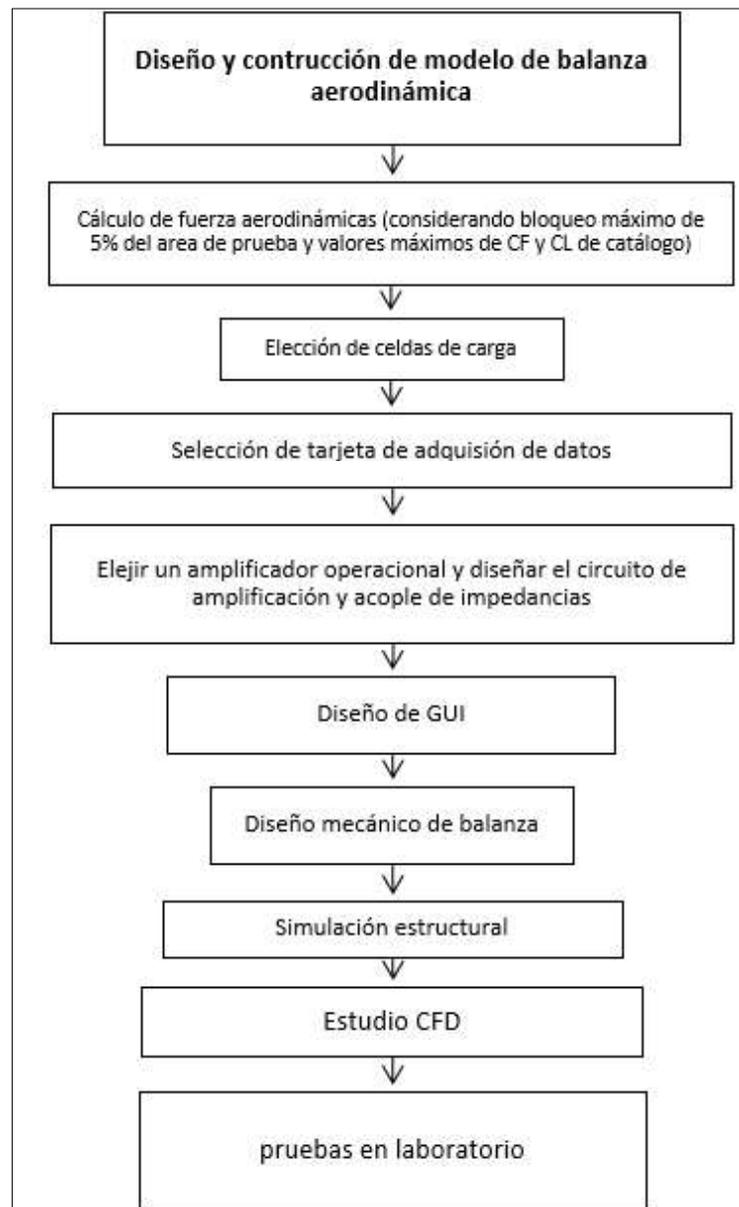
### 2.1. Estrategia metodológica.



**Figura 2.1.** Metodología de desarrollo para la obtención de fuerzas aerodinámicas.  
(Fuente: Autor)

En la Figura 2.1 se detalla la metodología utilizada para el desarrollo del prototipo de balanza aerodinámica para la determinación de las fuerzas. Primero se realiza la revisión bibliográfica que se refiere a estudios experimentales y literarios de prototipos ideales para la obtención de las fuerzas aerodinámicas, tomando como base los estudios encontrados se realiza la selección de implementos existentes en el mercado y de esta manera se desarrolla el diseño de un prototipo de balanza aerodinámica. Al haber diseñado un prototipo viable se procede a realizar la construcción e implementación de los instrumentos. Es necesario realizar la

calibración de los elementos para tratar de asegurar un correcto funcionamiento del prototipo construido. Las metodologías anteriores se validan mediante la comparación de los datos de los coeficientes obtenidos durante las pruebas con los valores aportados por el informe 460 de la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), además de determinar el porcentaje de error y el valor de incertidumbre que el prototipo entrega. Si se detectan errores en la toma de datos se debe determinar cuáles son las mejoras viables para reducir o eliminar los errores producidos.



**Figura 2.2.** Diagrama de operaciones  
(Fuente: Autor)

La Figura 2.2 muestra el diagrama de operaciones para el diseño de la balanza aerodinámica de acople inferior, donde se muestra cada una de las etapas que se detallarán a continuación.

## **2.2. Diseño del Prototipo de Balanza Aerodinámica y Selección de Componentes.**

En esta sección se detalla el diseño y selección de los diferentes elementos y dispositivos del prototipo de balanza aerodinámica, iniciando por el sistema de adquisición de datos que aborda la selección de sensores, diseño del circuito de amplificación y diseño de la interfaz de usuario, seguido por el diseño del prototipo de la balanza que aborda selección de material y determinación de espesores y tamaños.

### **2.2.1. Sistema de adquisición de datos.**

#### **2.2.1.1. Sensores.**

Los sensores que nos permiten medir fuerza son las llamadas celdas de carga que serán seleccionadas a continuación:

Para determinar la celda de carga es necesario contar con el valor de la densidad del aire y la velocidad del fluido en la zona de pruebas, para el primer dato se toma el valor de densidad de  $1,23 \frac{Kg}{m^3}$  proveniente de un trabajo de titulación previo (Topa Chuquitarco, 2017), mientras que para el valor de velocidad se midió mediante el anemómetro que cuenta el laboratorio de la facultad, obteniendo un valor de  $39,2 \frac{m}{s}$

El cálculo de la fuerza máxima se desarrolla en base al área de la sección transversal de la zona de pruebas que es de 30 cm x 30 cm, y siguiendo las recomendaciones que indican que los elementos de prueba deben ser menores al 5% de la zona de prueba (Morris, 2010), dando un valor de area de  $0,0045 m^2$  que se aproxima a  $0,005 m^2$ .

En primer lugar se determinará la presión dinámica mediante la ecuacion 1-3

#### **Datos:**

$$v = 39,2 \frac{m}{s}$$

$$\rho = 1,23 \frac{Kg}{m^3}$$

$$A_2 = 0,005 m^2$$

### Presión Dinámica

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$q = \frac{1}{2} \left[ \left( 1,23 \frac{Kg}{m^3} \right) \left( 39,2 \frac{m}{s} \right)^2 \right]$$

$$q = 945,03 \frac{Kg}{ms^2}$$

Una vez determinada la presión dinámica es necesario determinar el perfil al que se someterá el prototipo de balanza para medir su rendimiento, se consideran los diferentes perfiles normalizados de la NACA, y se elige el perfil NACA 0012 que es un perfil simétrico constituyéndose en un perfil de fácil fabricación y del cual se puede encontrar gran cantidad de características ya que existen muchos estudios dedicados al mismo.

Mediante la ecuación 1-1 y ecuación 1-2 y considerando los valores máximos de CL igual a 2 y de CD igual a 0,44 proporcionados por el reporte de la NACA, se podrá calcular el valor máximo de fuerza que podrá generar el fluido en el perfil aerodinámico.

#### Coefficiente de Sustentación

$$C_L = \frac{L}{qS}$$

$$L = C_L * q * S$$

$$L = (2) * \left( 665,68 \frac{Kg}{ms^2} \right) * (0,005 m^2)$$

$$L = 6,657N \approx 0,674 Kgf \approx 1,485 lbf$$

#### Coefficiente de Arrastre

$$C_D = \frac{D}{qS}$$

$$D = C_D * q * S$$

$$D = (0,44) * \left( 665,68 \frac{Kg}{ms^2} \right) * (0,005 m^2)$$

$$D = 1,464N \approx 0,15Kgf \approx 0,339 lbf$$

Una vez determinadas las fuerzas máximas que pueden presentarse se identifica que se necesita una celda de 1,5 lbf para sustentación, y una de 0,339 lbf para arrastre. Con el objetivo de resguardar el modelo y brindarle un coeficiente de seguridad se elegirán celdas de mayor valor al calculado. Además del valor de fuerza se tomará en cuenta que se requiere un material resistente a la corrosión, y la celda debe tener una buena sensibilidad.

Uno de los fabricantes más confiables con excelentes equipos de alta calidad es la empresa OMEGA, que en cuyo catálogo cuenta con celdas de múltiples valores de carga nominal siendo la celda de carga LCM703-150 la seleccionada, que cuenta con un valor nominal de 10lbf, está fabricada en acero inoxidable, se alimenta con un voltaje de 10 a 15V, y tiene una salida de 2mV/V

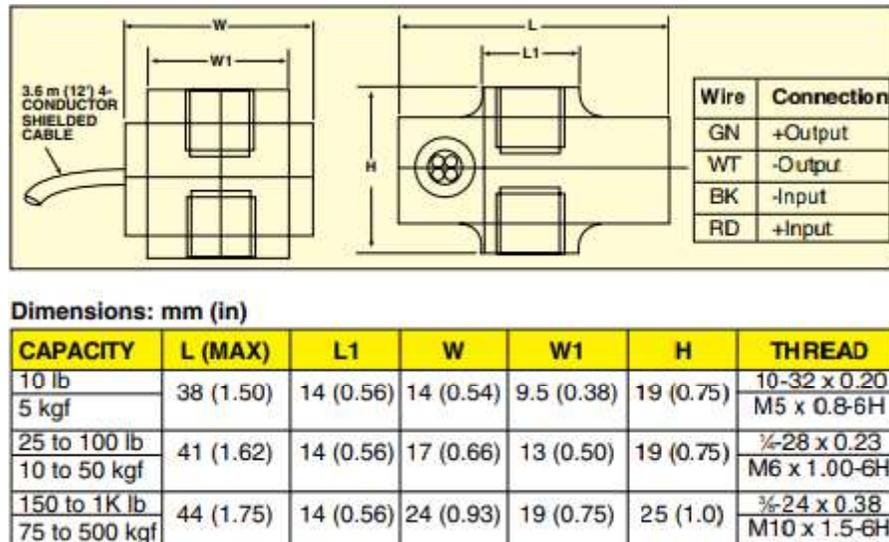


**Figura 2.3.** Celda de Carga OMEGA LCM703-150

(Fuente: (OMEGA, Miniature Low Profile Tension Link Load Cells Metric Ranges, 19 to 25 mm Height, s.f.))

La LC703/LCM703 puede determinar cargas de tensión y compresión por lo que se adaptará correctamente a nuestra aplicación, además como muestra la Figura 2.3 dispone de dos orificios que servirán para la unión con los diferentes mecanismos. (OMEGA, Miniature Low-Profile Tension Links)

En la Figura 2.4 se esquematizan las dimensiones de la celda que serán consideradas para el diseño del prototipo mecánico de la balanza.



**Figura 2.4.** Dimensiones Celda de Carga OMEGA  
(Fuente: (OMEGA, Miniature Low-Profile Tension Links))

### 2.2.1.2. Tarjetas de adquisición de datos.

Para la selección se considerará dos opciones, un Arduino y una tarjeta de adquisición de datos de la national instruments, los mismos que serán comparados cualitativamente y cuantitativamente para determinar la mejor opción.

## Arduino

**Tabla 2.1:** Descripción cualitativa y cuantitativa de un Arduino UNO

Criterio	Evaluación Cualitativa	Evaluación Cuantitativa
Costo	Su costo relativamente bajo que se puede conseguir modelos de buenas prestaciones como el arduino uno un precio de 10 USD	2
Característica	Toma un tiempo de muestreo de 112 micro segundos, por lo mismo se dice que tiene un muestreo de frecuencia de 8,928 KHz	6
Montaje	Para realizar el montaje es necesario la construcción de una caja protectora, ya que toda su placa se encuentra descubierta y algún fluido o una incorrecta manipulación podría causar daños	7
Vida útil	Según datos obtenidos de una ficha técnica el Arduino UNO posee una vida útil de 30000 ciclos alrededor de 8,2 años en un uso de 10 veces en un día.	7

(Fuente: Autor)

### Tarjeta de Adquisición de Datos NI DAQ USB-6009

La serie específica de la tarjeta no fue seleccionado, sino que es una tarjeta que se encuentra ya disponible de un trabajo de titulación anterior (Topa Chuquitarco, 2017)

La tarjeta de adquisición de datos NI DAQ USB 6009 es un dispositivo que proporciona la función de un sistema de adquisición de datos para aplicaciones como el registro de datos de entrada, mediciones portátiles y experimentos académicos en laboratorios. (Instruments, s.f.)

El NI USB-6008/6009 tiene ocho canales de entrada analógica que puede usar para cuatro mediciones de entrada analógica diferencial u ocho mediciones de entrada analógica de un solo extremo. (Artisan Technology Group, 2012)



Mediante el uso de análisis comparativo entre las Tablas 2.1, Tabla 2.2, y Tabla 2.3 se determina que la mejor opción es la NI-USB DAQ 6009 con una puntuación de treinta y seis sobre cuarenta.

### 2.2.1.3. Circuito de amplificación y acople de impedancias

Las celdas de carga entregan una diferencia de voltajes en valores de milivoltios que por su valor tan pequeño es complicado por no decir imposible leer sus variaciones, por lo que se hace necesario el diseño de un sistema de amplificación de señal basado en amplificadores de instrumentación, además al momento de realizar pruebas al vacío con las celdas de carga se constató que existe una variación de voltajes al conectar las celdas en la tarjeta de adquisición, obligando al diseño de un circuito de acople de impedancias.

El circuito diseñado se basa en un integrado AD620 que es un amplificador de instrumentación de bajo costo y alta precisión, que proporciona ganancias que van desde 1 a 10 000, también incorpora un elemento LM741 que es un amplificador operacional que servirá para el acople de impedancias. Finalmente, el circuito consta de un filtro pasa bajos y de resistencias necesarias para el correcto funcionamiento del mismo, cabe indicar que cada pareja de transistores es necesario para cada celda, por lo que el circuito consta de cuatro amplificadores. La Figura 2.5 muestra el circuito diseñado en proteus, donde claramente se puede identificar el circuito de amplificación y acople de impedancias.

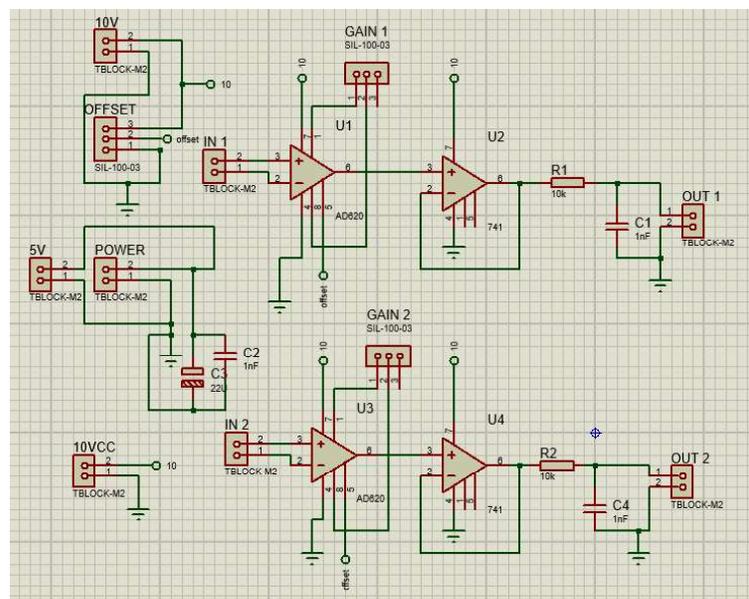


Figura 2.5. Circuito de amplificación y acople de impedancias  
(Fuente: Autor)

Una vez elegidos los componentes, se selecciona un sistema de alimentación que proporcione los valores de voltaje y corriente necesarios para el funcionamiento, tanto del circuito como de las celdas de carga. La mejor opción es aprovechar la fuente de 5 voltios con que cuenta la tarjeta USB6009 y mediante un step up incrementar dicho voltaje a 12 voltios mismos que son necesarios para las celdas de carga.

Con los elementos electrónicos y fuente seleccionada se diseña la tarjeta mostrada en la Figura 2.6, que cuenta con zócalos de entrada y salida de voltaje para permitir su conexión a la fuente, poder alimentar a las celdas de carga, y recibir las señales provenientes de dichas celdas.



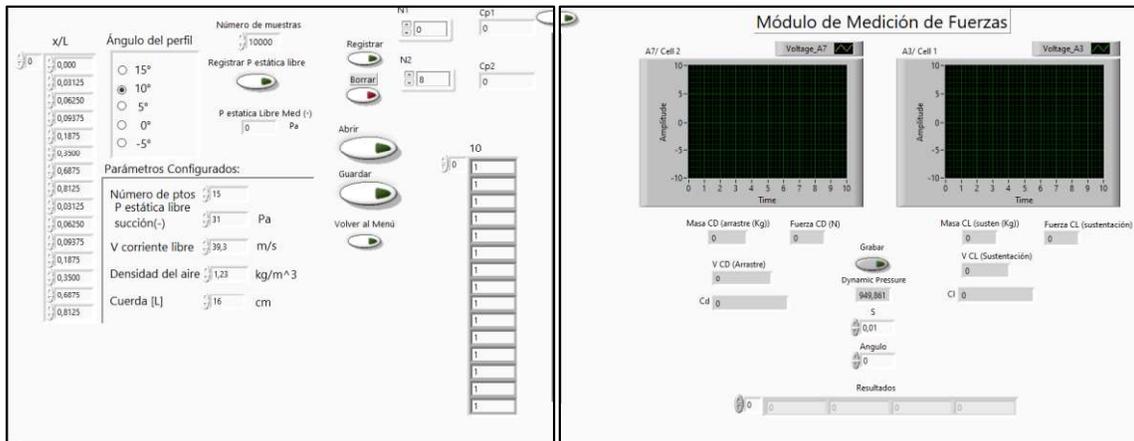
**Figura 2.6.** Diseño de tarjeta 3D  
(Fuente: Autor)

#### **2.2.1.4. Interfaz de usuario (GUI)**

Una vez seleccionado los dispositivos del sistema de adquisición de datos, se hace necesario el diseño de un GUI (Graphical user interface), para lo cual se empleará LabView que es un paquete informático perteneciente a la misma casa constructora de la tarjeta seleccionada. La ventaja de utilizar dicho software es que cuenta con librerías gráficas para el desarrollo del programa y principalmente que no requiere instaladores externos para comunicarse con la tarjeta, pues la misma tarjeta cuenta con el controlador necesario para vincularse con LabView.

Otra razón para seleccionar el software es que el proyecto de instrumentación anterior ya contaba con una GUI diseñada en LabView, por lo que el actual proyecto simplemente editará dicho GUI aumentando un módulo de medición de fuerzas.

Como se puede observar en la Figura 2.7 en el lado izquierdo se muestra el interfaz de trabajo para determinar el coeficiente de presión realizado por el Ing. Cristian Topa (trabajo previo), y en el derecho el módulo de medición de fuerzas (trabajo actual)



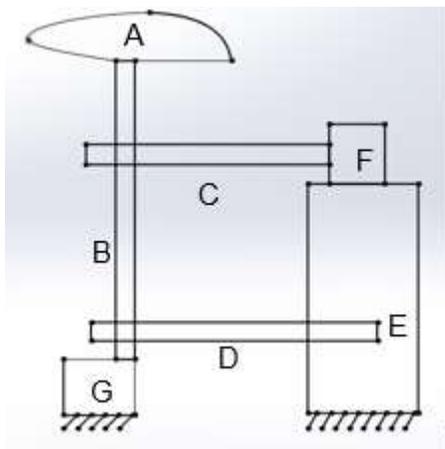
**Figura 2.7.** Software de Adquisición de Datos.  
(Fuente: Autor)

El módulo de medición de fuerzas cuenta con dos gráficos, los mismos que están etiquetados con el correspondiente puerto de la tarjeta al cual están censando, también permite visualizar el valor de masa, fuerza y coeficiente tanto de arrastre (derecha) como de sustentación (izquierda). Además, permite ingresar el valor del área de análisis, ingresar el ángulo de ataque, y visualizar la presión dinámica del ensayo. Para poder registrar los resultados se acondicionó el GUI con un botón de registro que guarda los valores de  $C_D$ ,  $C_L$ , área, y ángulo de ataque en un documento de Excel.

### 2.2.2. Diseño y Construcción de la Balanza Aerodinámica.

En base a los diseños estudiados en el estado del arte, se procede a diseñar un boceto de un mecanismo que servirá como base para el diseño definitivo de la balanza, el primer aspecto a considerar es, si la balanza será de acople lateral o inferior, inclinándose por este último con el objetivo de aprovechar la placa de acrílico con la que cuenta el túnel de viento.

La Figura 2.8 muestra el mecanismo fundamental el mismo que está provisto por el elemento de estudio A, seguido por una barra B que transmitirá la fuerza a la celda de sustentación (G), mientras que el elemento C transmitirá la fuerza de arrastre a la celda respectiva (F), el elemento D cumple la función de pivote permitiendo únicamente el movimiento de la barra C. Finalmente el elemento E sirve de anclaje para la celda de arrastre F.



**Figura 2.8.** Boceto de mecanismo para balanza aerodinámico  
(Fuente: Autor)

### **Selección de material**

Otro aspecto inicial es la selección del material, que debe cumplir con condiciones de resistencia a la corrosión, y contar con perfilería en el mercado local. Entre los materiales opcionados se encuentra, el acero al carbono, aluminio estructural y acero inoxidable. A continuación, se realiza un estudio cualitativo y cuantitativo para elegir la mejor opción.

**Tabla 2.4.** Análisis cuantitativo y cualitativo del acero al carbono

Característica	Análisis cualitativo	Análisis Cuantitativo
Resistencia a la corrosión	Necesita recubrimiento	5
Resistencia mecánica	Aceros de medio carbono cuentan con buena resistencia	8
Disponibilidad en mercado local	Existen planchas, varillas, y perfiles de todas formas y tamaños	10
Costo	Relativamente económico	9
Peso	Peso considerable	6
Maquinabilidad	Talleres simples pueden trabajar con este material	9

(Fuente: Autor)

**Tabla 2.5.** Análisis cuantitativo y cualitativo del aluminio comercial

Característica	Análisis cualitativo	Análisis Cuantitativo
Resistencia a la corrosión	No necesita recubrimientos	10
Resistencia mecánica	Menor a la de los aceros al carbono pero aleado con silicio y magnesio alcanza valores muy aceptables	7
Disponible en mercado local	Buena perfilería disponible, pero pocas opciones en lo referente a planchas	8
Costo	Medianamente económico	8
Peso	Liviano	9
Maquinabilidad	Se necesita de talleres con maquinaria especial	7

(Fuente: Autor)

**Tabla 2.6.** Análisis cuantitativo y cualitativo del acero inoxidable

Característica	Análisis cualitativo	Análisis Cuantitativo
Resistencia a la corrosión	No necesita recubrimientos	10
Resistencia mecánica	Por sus elementos aleados cuenta con excelentes valores de resistencia	9
Disponible en mercado local	Disponibilidad de planchas, pero baja en perfiles	7
Costo	Altamente costoso	6
Peso	Altamente considerable	5
Maquinabilidad	Se necesita de talleres con maquinaria especial	7

(Fuente: Autor)

En base a las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 el material seleccionado es el aluminio con una puntuación de 49 puntos sobre 60 posibles.

### ***Diseño del Prototipo de Balanza Aerodinámica.***

El diseño final de la balanza se lo obtuvo a partir del mecanismo base, el material y su perfilería disponible, la maquinaria disponible en el taller mecánico y la habilidad del técnico con la asesoría del tesista. En este punto es importante indicar que es reducido los talleres que se prestan a la construcción de proyectos de titulación.

En el anexo III se puede visualizar el diagrama de operaciones que esquematiza de forma breve las operaciones que fueron seguidas para la construcción del prototipo.

Lastimosamente no se puedo tener acceso a un taller con maquinaria especializada para el trabajo en aluminio, pero se obtuvo un buen modelo basado más en la experiencia y habilidad del constructor.

La Figura 2.9 y Figura 2.10 muestran dos etapas de la construcción del modelo basado en planchas de aluminio de 3 mm y 1,5 mm de espesor. Para los elementos de transmisión de fuerza se optó por utilizar plancha de 3 mm de espesor con un ancho de 30 mm dobladas para brindarles mayor resistencia. Una de las dificultades del trabajo en aluminio es lo complejo que resulta realizar juntas soldadas, pero al contar con esta restricción se optó por utilizar juntas pernadas, que incluso le convierte en un prototipo desmontable y más versátil.



**Figura 2.9.** Construcción de la balanza y montaje de los elementos.  
(Fuente: Autor)



**Figura 2.10.** Construcción del mecanismo para la obtención de CL.  
(Fuente: Autor)

La construcción del prototipo tuvo una duración de dos días, donde fue construido la bancada, el mecanismo de transmisión de fuerzas formada por dos horquillas (elementos forma de C), una barra en acero con un perno que permite regular la altura, y de un mecanismo para la variación del ángulo de ataque formada por una varilla roscada galvanizada.

### ***Perfil aerodinámico, mecanismo de acople, y anclaje al túnel de viento***

Para culminar con el modelo de balanza se requiere el elemento de prueba (NACA 0012) que también será construido, y el mecanismo que permita su adaptación al prototipo; procesos que se detallarán a continuación:

El modelo del perfil aerodinámico se basa en la forma como la NACA codifica a la geometría de los perfiles aerodinámica mediante cuatro dígitos, donde cada dígito indica una característica determinada; el primer dígito muestra la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (Distancia entre el borde delantero y posterior del ala, la cual se mide de forma paralela al flujo de aire); el segundo muestra la ubicación del camber máximo en décimas de la cuerda y los dos últimos dígitos el espesor máximo en porcentaje de la cuerda. Por ejemplo, el perfil aerodinámico 4412 es un perfil grueso del 12% teniendo un camber del 4% localizado un 0,4% desde el borde de ataque. (McCormick, Phd, 1926)

Uno de los principales perfiles aerodinámicos existentes creados por la NACA es el perfil simétrico el cual es comúnmente utilizado en superficies de control como por ejemplo el estabilizador horizontal y el estabilizador vertical (Rudder y Elevator). Este perfil simétrico se define en la familia de cuatro dígitos, pero en este caso sus dos primeros dígitos están

dispuestos o designados de ceros. El perfil simétrico no posee camber, por lo contrario, solo posee espesor. (Paz Pinzón, 2013)



**Figura 2.11.** Perfil Simétrico NACA 0012  
(Fuente: (Paz Pinzón, 2013))

La mejor opción que permita mantener la exactitud en forma y además agilite el proceso de fabricación es la impresión 3D, para lo cual primero se debe generar su modelo en algún paquete de CAD. Para poder modelar el perfil se utiliza la ecuación 2-1 y en base al tamaño de la zona de pruebas se determinan las demás dimensiones del perfil.

$$y = \pm 0,594689181 \times [0,298222773 \times \sqrt{x} - 0,127125x - 0,357907x^2 + 0,291984x^3 - 0,105174606x^4]$$

Ecuación 2-1

La Ecuación 2-1 representa un perfil de dimensión unitaria, que debe ser multiplicada por un valor de escala para adaptar a la aplicación necesaria, para el actual caso particular se empleará un perfil de cuerda 150 mm (Airfoil Tools, 2019)

La siguiente parte es diseñar el acople del perfil al modelo de balanza, para lo cual se realizó el perfil con dos orificios para que permitan el alojamiento de dos tuercas, se diseñó un soporte que se adapta a la barra de acero, y finalmente un acople para la variación del ángulo de ataque. La Figura 2.12 muestra el perfil (blanco), soporte (negro) y acople (rojo) realizados mediante impresión 3D en calidad estándar con un relleno del 50%.



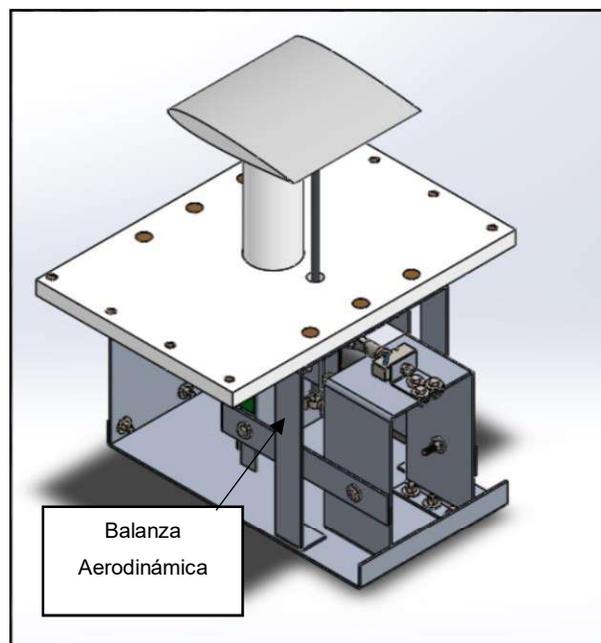
**Figura 2.12.** Perfil NACA 0012 y acoples construidos.  
(Fuente: Autor)

Para terminar con la ejecución del prototipo se hace necesario buscar la manera de anclar la bancada de la balanza al túnel de viento, para lo cual se realizaron perforaciones mediante corte laser en la placa de acrílico que sirve como tapa inferior de la zona de prueba del túnel de viento, y se mecanizó seis pernos guía en bronce fosfórico que se alojan en las perforaciones antes indicadas.

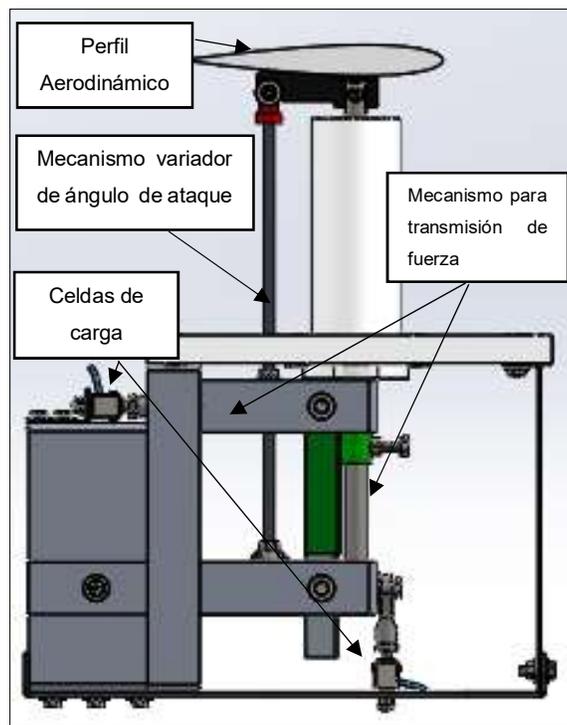
### Diseño definitivo

Una vez finalizada la construcción se procede a modelar el sistema con las dimensiones finales para realizar comprobaciones mediante simulaciones de CAE y poder comprobar su resistencia mecánica y además visualizar las posibles alteraciones que el modelo podría generar al flujo libre de aire.

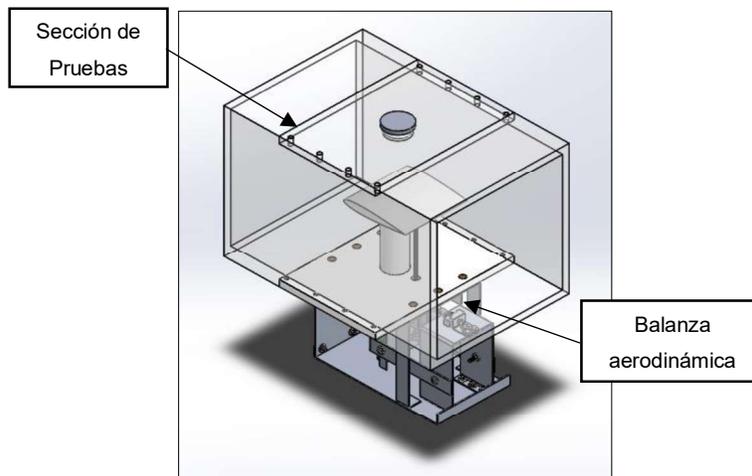
La figura 2.13 muestra la vista isométrica del prototipo de balanza diseñado en un software de CAD, mientras que la Figura 2.14 y Figura 2.15 detallan los principales elementos constitutivos del prototipo de balanza, destacando la colocación de las celdas, los mecanismos de transmisión de fuerza y el mecanismo de regulación del ángulo de ataque. Además, muestran la forma como se encuentra colocada en la zona de prueba perteneciente al túnel de viento.



**Figura 2.13.** Prototipo de balanza aerodinámica  
(Fuente: Autor)



**Figura 2.14.** Balanza aerodinámica en vista lateral derecha  
(Fuente: Autor)

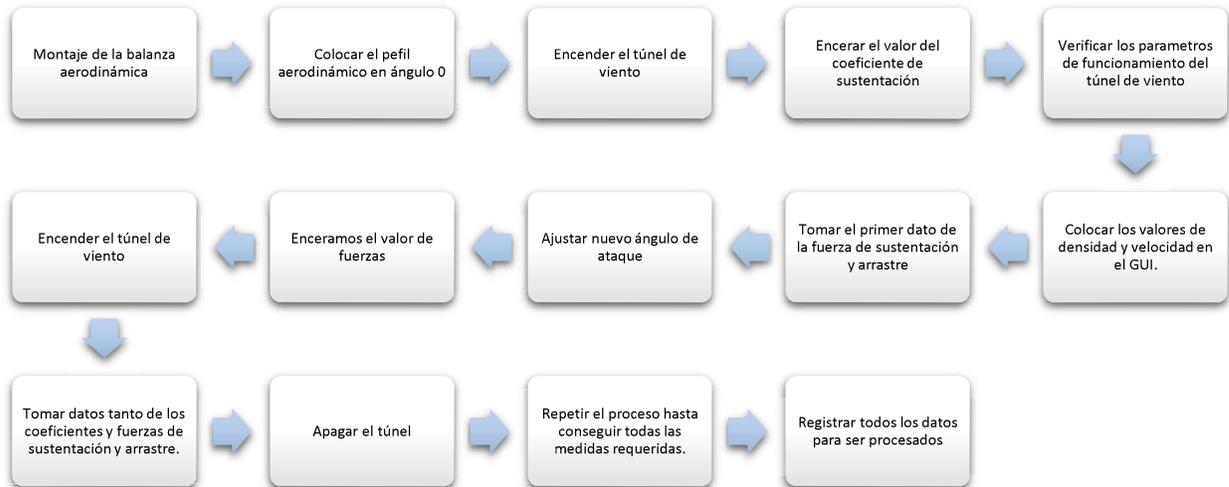


**Figura 2.15.** Balanza Aerodinámica en vista isométrica  
(Fuente: Autor)

### 2.3. Procedimiento de los Ensayos.

Una vez construido el prototipo es necesario evaluar el rendimiento del mismo mediante un proceso de pruebas. El primer paso es realizar pruebas de las celdas de carga al vacío (fuera del prototipo de balanza) con el objetivo de determinar las ecuaciones que permitan convertir

el voltaje medido en medidas de masa (kilogramos, libras), posteriormente se realizará mediciones de la velocidad del flujo de aire en el túnel de viento, seguido de una inspección del estado del túnel para realizar ajuste y puestas a punto en caso de ser necesarias, y finalmente seguir el procedimiento mostrado en la Figura 2.16 que permitirá cuantificar las variaciones del valor experimental con el esperado.



**Figura 2.16.** Diagrama de procesos  
(Fuente: Autor)

Cabe indicar que el proceso de pruebas se repetirá diez veces en cada ángulo de ataque que va desde -4 grados a 20 grados con incrementos de 4 grados.

## 2.4. Análisis de incertidumbre

El análisis de incertidumbre es un estudio fundamental que se realiza para determinar los factores que intervienen en la toma de datos en prototipos de estudio, para cuantificar la incertidumbre en el presente trabajo de investigación se debe determinar los tres factores influyentes en el sistema (prototipo mecánico, sensores (celdas de carga) y tarjeta de adquisición de datos).

Para el primer factor se toma en cuenta los datos obtenidos en las mediciones durante las pruebas, mediante la determinación de la desviación estándar que influye directamente en el valor de la incertidumbre.

La ecuación 2-2 se utiliza para determinar la incertidumbre aleatoria a través de la desviación estándar S al realizar diez pruebas en las que se medirán las variaciones de los datos. (Topa Chuquitarco, 2017)

$$U_A = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Para determinar la incertidumbre que produce un elemento electrónico se utiliza la Ecuación 2-4 pero previamente se calcula la exactitud con la Ecuación 2-3

$$E = \frac{(\text{Tolerancia})(\text{Intervalo de medición})}{100} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

$$U_{B1} = \frac{E}{\sqrt{3}} * \#Sensores \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Todo elemento electrónico produce un valor de incertidumbre, en el caso de la tarjeta de adquisición de datos entrega un valor de 0,0023 (Topa Chuquitarco, 2017).

Para la obtención del valor total de incertidumbre dentro del sistema de la balanza de adquisición de datos se utiliza la ecuación 2-4

$$U_{Total} = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{Tarjeta}^2} \quad \text{Ecuación 2-5:}$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos durante las pruebas realizadas en el túnel de viento del laboratorio LMFT. Para determinar la efectividad de la balanza aerodinámica fabricada se realiza un análisis comparativo entre los datos entregados por el informe de la NACA en su perfil 0012 y los valores obtenidos en la práctica.

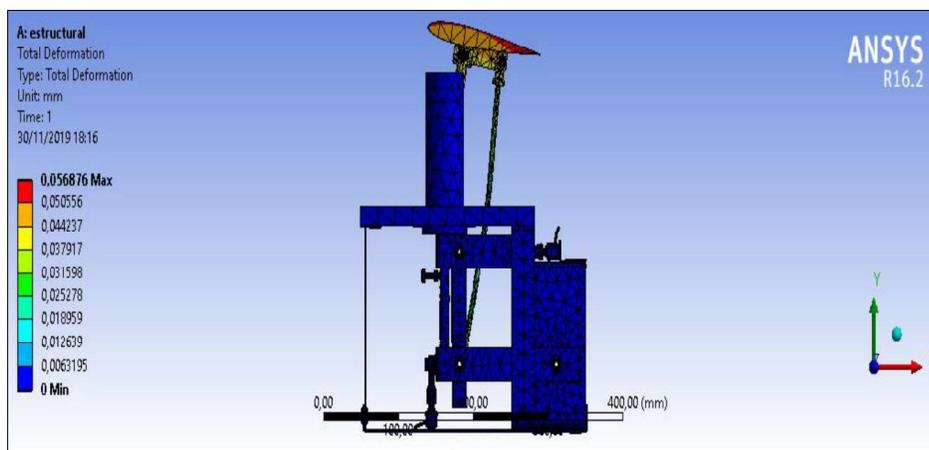
Además, se detalla los resultados de dos estudios CAE realizados para medir la resistencia mecánica y los efectos que se generan en el flujo producto de la presencia de los acoples.

#### 3.1. Simulaciones estructurales y CFD

El primer análisis a realizar será el de resistencia mecánica que consistirá en aplicar una fuerza de 10N en dirección horizontal en el perfil aerodinámico, con dicha simulación se comprobará los valores de resistencia y deformación máxima generados en el modelo.

Dentro de los parámetros fundamentales en la simulación está la asignación de material para establecer el valor de Young, gracias a las buenas librerías disponibles en el mismo software no es necesario ingresar valores, sino simplemente indicar el material de cada elemento.

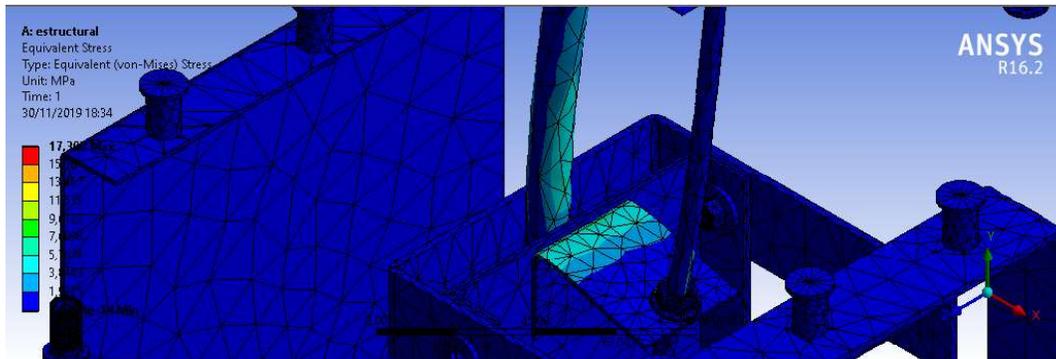
La Figura 3.1 muestra la deformación total del prototipo que alcanza un valor máximo de 0.05 mm justamente en la barra de soporte del perfil aerodinámico, el valor es extremadamente pequeño que no contaminarán la toma de datos de los ensayos.



**Figura 3.1.** Simulación de la deformación total  
(Fuente: Autor)

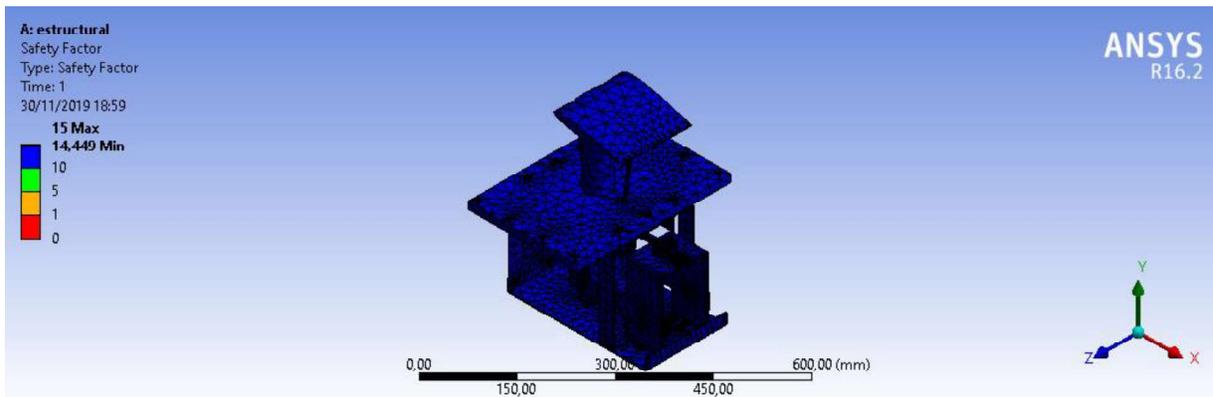
Es de suma importancia detectar la zona con mayor esfuerzo durante el funcionamiento del prototipo, que mediante la simulación se confirma que se ubica en la barra de soporte

justamente en el empotramiento del tornillo de regulación del ángulo de ataque. El valor de esfuerzo máximo hallado es de 17,3 MPa que está por debajo del valor de esfuerzo máximo que soporta el material., dichos resultados pueden ser observados en la Figura 3.2



**Figura 3.2.** Esfuerzos máximos generados  
(Fuente: Autor)

La última parte del estudio estructural es la determinación del coeficiente de seguridad que se muestra en la Figura 3.3

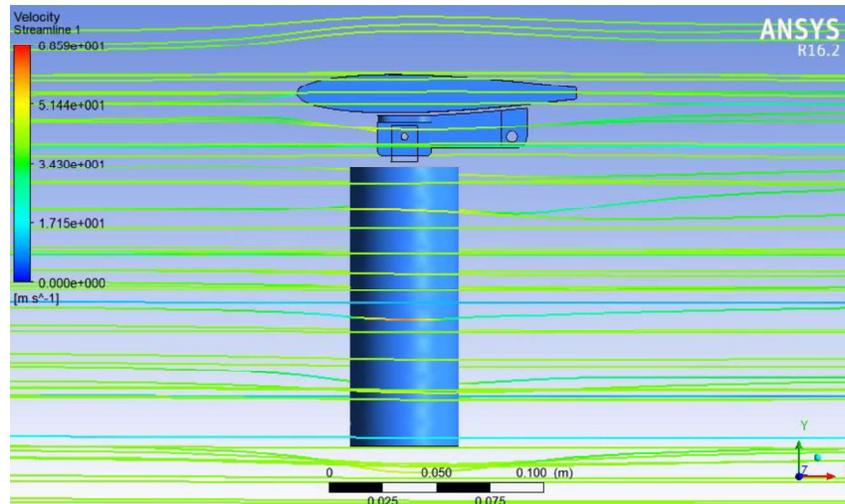


**Figura 3.3.** Coeficiente de seguridad  
(Fuente: Autor)

El valor del coeficiente de seguridad mínimo es de 14,45 por lo cual se puede garantizar el correcto funcionamiento del diseño.

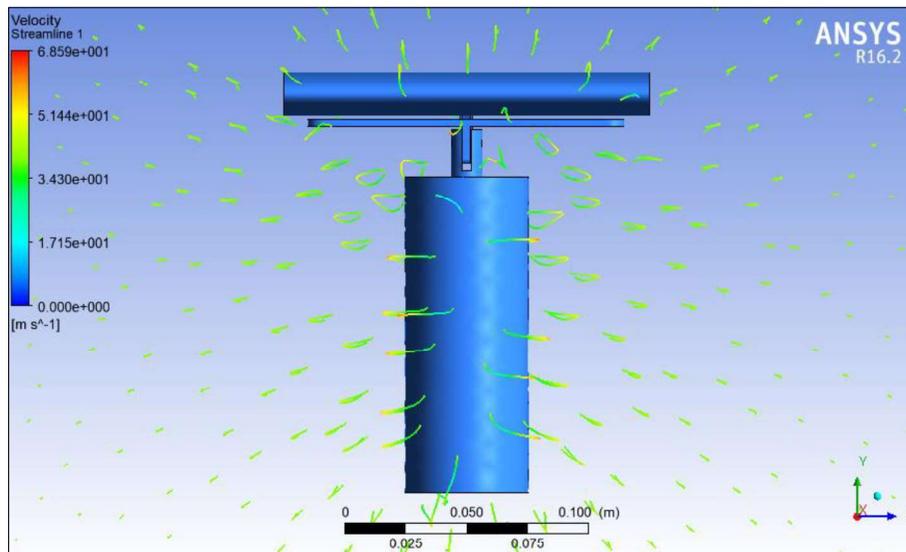
El segundo estudio es la simulación del paso del flujo de aire al cual estará sometido el perfil aerodinámico en el túnel de viento, dicho estudio tiene como objetivo visualizar las líneas de corriente de aire y poder establecer cualitativamente si los mecanismos de adaptación del perfil a la balanza generan alteraciones significativas que podrían contaminar los resultados de los casos de estudio. La Figura 3.4 muestra las líneas de flujo en la vista lateral, que muestran

ciertas alteraciones en las líneas horizontales normales del flujo en la parte inferior del elemento que sirve como base del perfil aerodinámico.

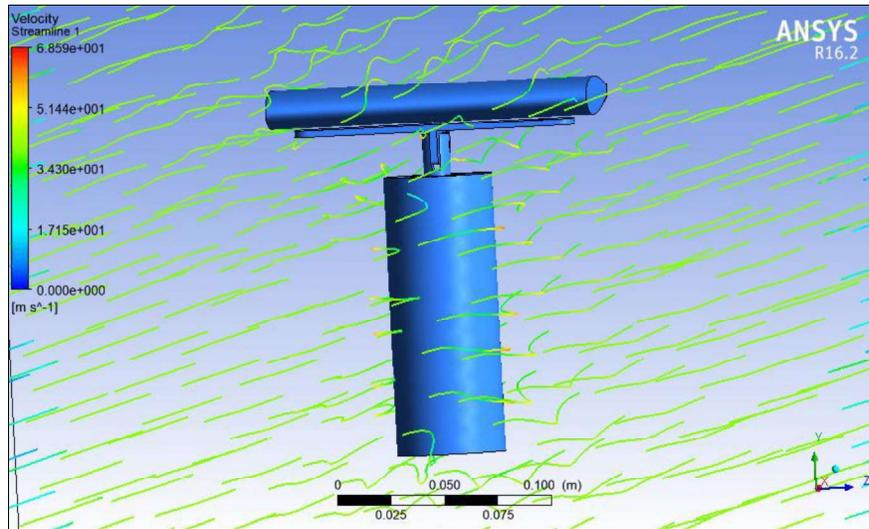


**Figura 3.4.** Líneas de flujo en vista lateral  
(Fuente: Autor)

La Figura 3.5 y Figura 3.6 muestran vistas frontales que confirman presencia de pequeñas turbulencias producidas por la geometría del soporte del perfil aerodinámico, dichas turbulencias generarán variaciones en las medidas que se desea censar. En el capítulo de pruebas y resultados se espera cuantificar dichas variaciones y en especial ser concluyentes en las medidas que se pueden tomar en trabajos futuros en caso de que las variaciones sean significativas.

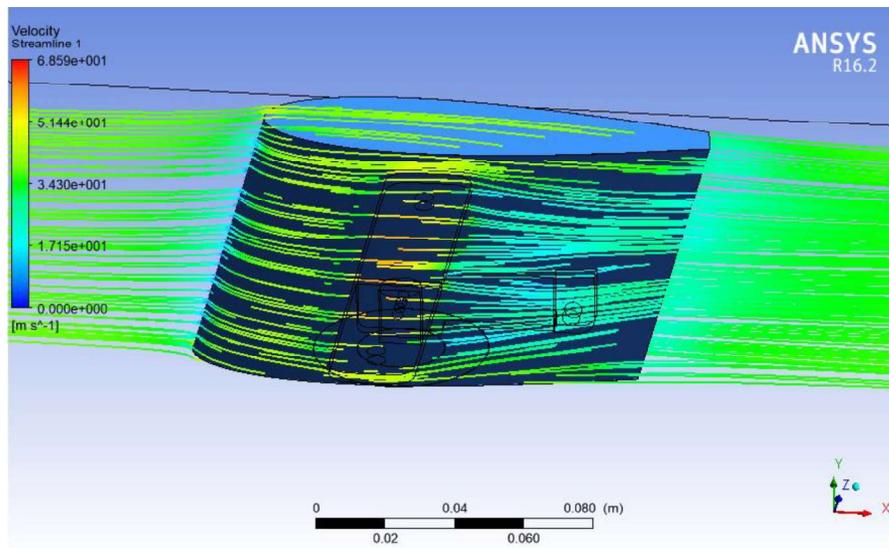


**Figura 3.5.** Líneas de flujo en vista frontal  
(Fuente: Autor)



**Figura 3.6.** Presencia de turbulencias en líneas de flujo de aire  
(Fuente: Autores)

La figura 3.7 muestra más claramente las alteraciones que sufre el flujo por presencia de los elementos de acople a la balanza aerodinámica, por lo que se espera variaciones tanto es lo valores de sustentación como de arrastre.



**Figura 3.7.** Turbulencia en elemento de prueba  
(Fuente: Autores)

### 3.2. Pruebas de celda fuera de la balanza

Las celdas de carga proporcionan medidas de voltaje que corresponden a un valor de masa específico; con la finalidad de encontrar la relación que nos permita convertir dichos valores, se realizan pruebas al vacío con pesas (masas de valor conocido).

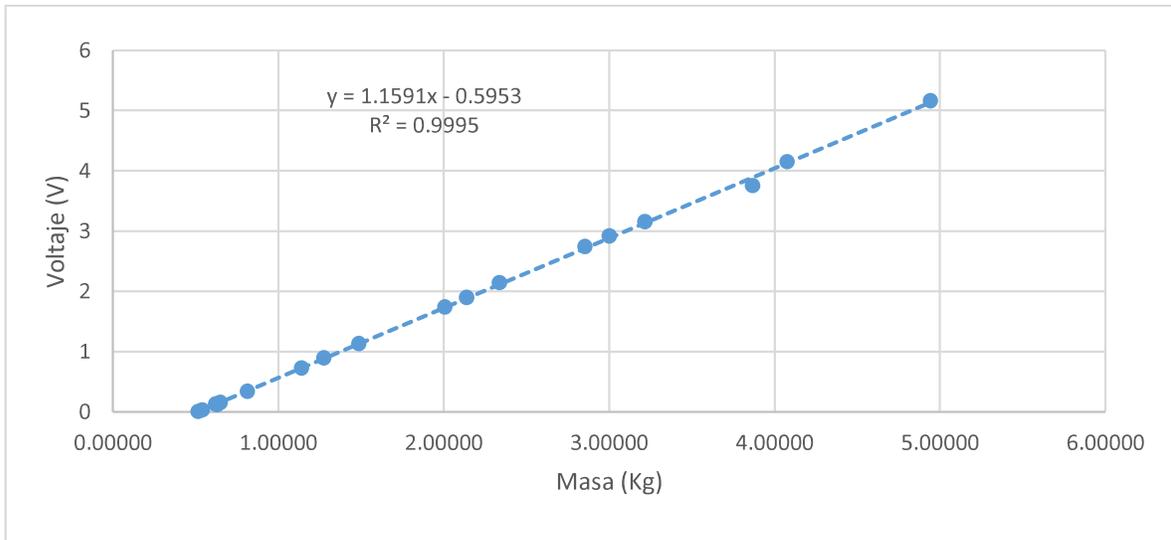
La tabla 3.1 muestra los valores de voltaje de las dos celdas que se generan con un valor de masa específico, el valor mostrado es un promedio de diez mediciones que se realizaron en cada valor de masa.

**Tabla 3.1.** Valores de voltaje y masa

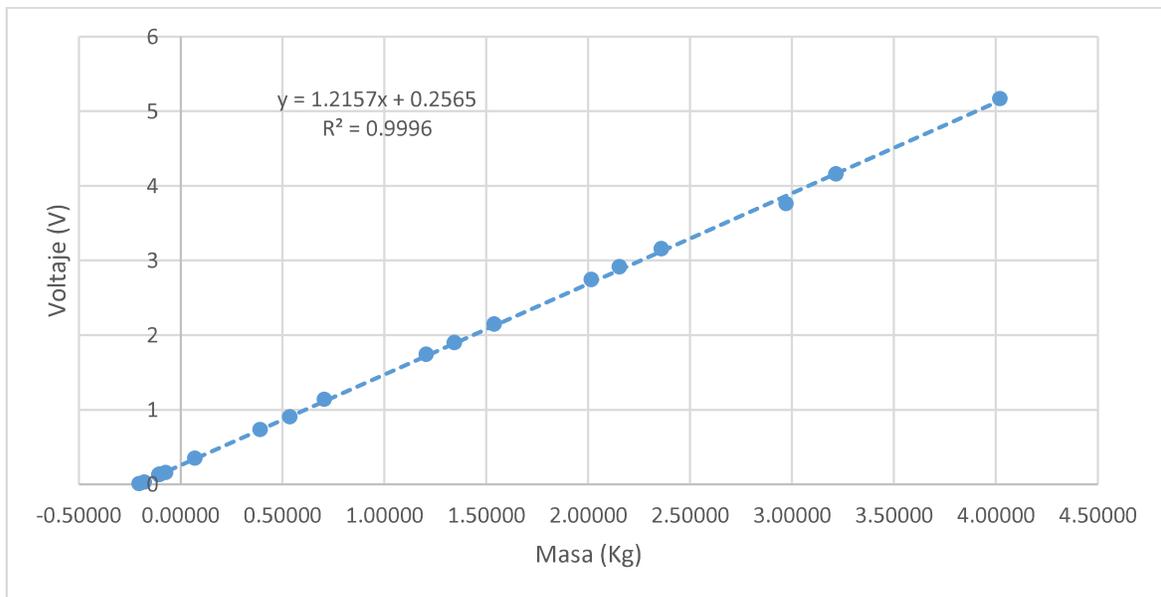
Celda 1		Celda 2	
Voltaje (V)	Masa (Kg)	Voltaje (V)	Masa (Kg)
0.51729	0	-0.20482	0
0.54219	0.027	-0.17834	0.027
0.62241	0.129	-0.09924	0.129
0.65244	0.152	-0.07304	0.152
0.81468	0.342	0.06897	0.342
1.14267	0.728	0.39063	0.728
1.27782	0.896	0.53493	0.896
2.00737	1.741	1.20483	1.741
2.14000	1.896	1.34419	1.896
2.85570	2.739	2.01445	2.739
3.00336	2.914	2.15278	2.914
3.87000	3.755	2.97038	3.755
0.63338	0.122	-0.10720	0.122
1.48979	1.134	0.70474	1.134
2.33963	2.141	1.53718	2.141
3.21830	3.154	2.35920	3.154
4.07915	4.152	3.21541	4.152
4.94567	5.166	4.02076	5.166

(Fuente: Autor)

Con los valores de la Tabla 3.1 se realizan los gráficos de las funciones y las regresiones lineales en Excel que permiten determinar las ecuaciones que relacionan el valor de voltaje con su valor de masa correspondiente. Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran las gráficas de las funciones y las ecuaciones correspondientes a cada celda

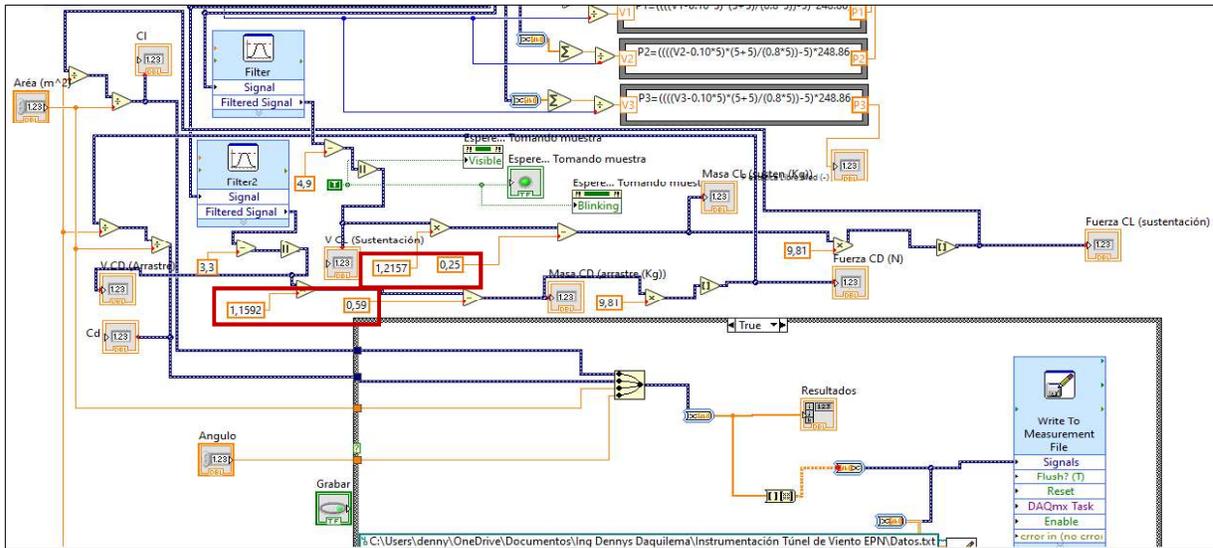


**Figura 3.8.** Valores de voltaje y masa de la celda 1  
(Fuente: Autor)



**Figura 3.9.** Valores de voltaje y masa de la celda 2  
(Fuente: Autor)

Las ecuaciones obtenidas son ingresadas en el diagrama de bloques del programa desarrollado en LabView, con lo cual se puede visualizar el valor de voltaje y masa que posteriormente es transformado en fuerza mediante la multiplicación de dicho valor por la gravedad en el sistema correspondiente. La Figura 3.9 muestra el diagrama de bloques con las ecuaciones cargadas.



**Figura 3.10.** Diagrama de bloques en LabView  
(Fuente: Autor)

### 3.3. Cálculo de Incertidumbre

Las incertidumbres deben ser calculadas en todos los modelos experimentales, pues proporcionan un intervalo que oscila alrededor del valor medido. Dichos valores de incertidumbre son cálculos en el Anexo XIV y resumidos en la Tabla 3.2

**Tabla 3.2.** Incertidumbres del prototipo de balanza

Elemento	Incertidumbre
Sensor	0.035
DAQ	0.0023
Prototipo	0.0078

(Fuente: Autor)

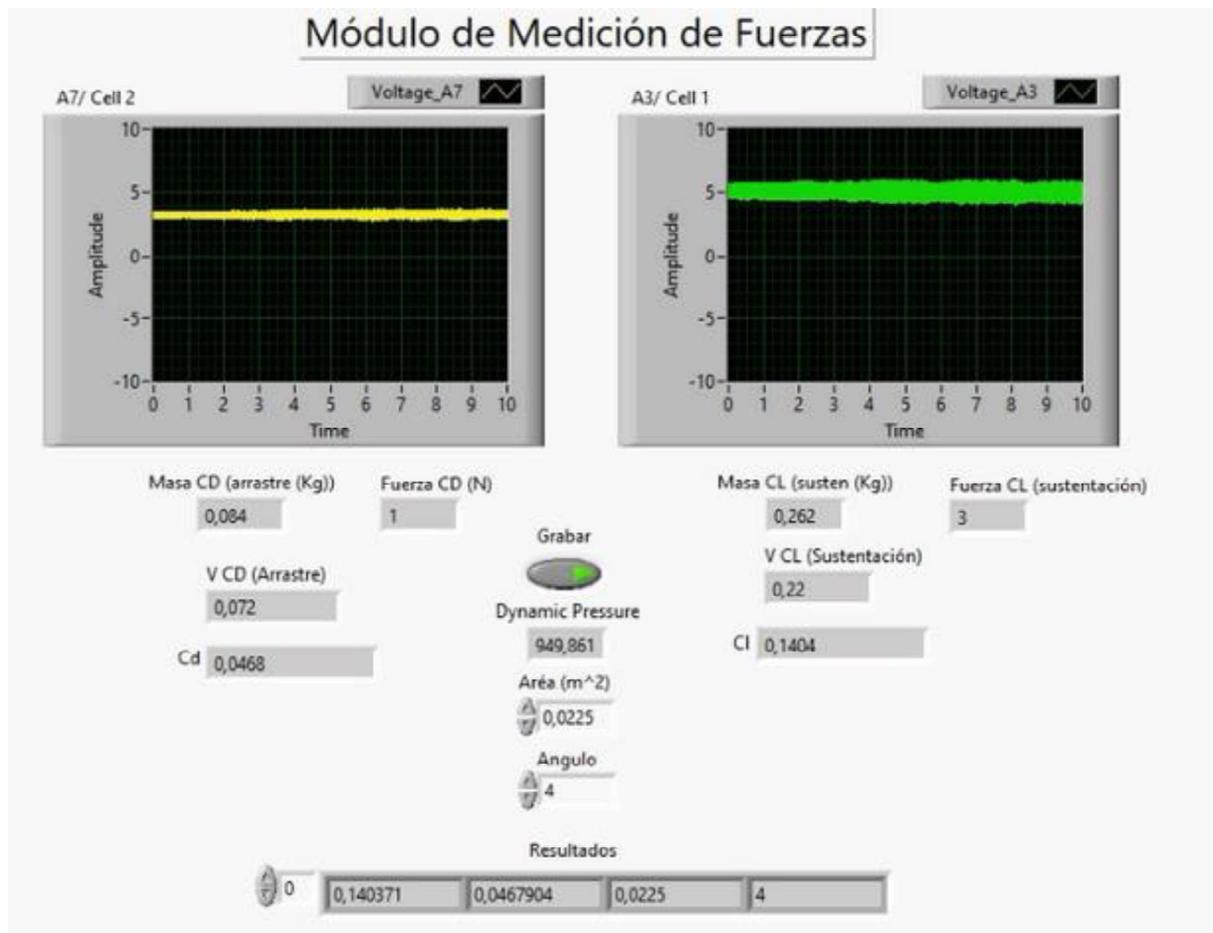
Con los resultados de la Tabla 3.2 y la Ecuación 2.4 se obtiene una incertidumbre total de 0.0359, valor que será utilizado en todas las comparaciones gráficas que se realicen y se traducen como gráficas que establecen un valor positivo y negativo alrededor del valor proporcionado por el prototipo.

### 3.4. Verificación del desempeño del modelo construido.

Para determinar la efectividad y confiabilidad del prototipo se compara los valores experimentales obtenidos y los mostrados en el informe 460 de la NACA, tanto para el

coeficiente de arrastre y sustentación. Se realiza una tabla para determinar los porcentajes de error de cada medida y también se compara las gráficas con los valores de incertidumbre.

Para iniciar con la comparación es importante indicar que el estudio se realizó con un perfil aerodinámico de cuerda 15 cm y de 15 cm de ancho, dando un área de  $225 \text{ cm}^2$  equivalente a  $0.0225 \text{ m}^2$ . Además los valores experimentales serán tomados de la hoja de cálculo proveniente del GUI desarrollado en el presente proyecto. En la figura 3.10 se observa la interfaz durante las pruebas a un ángulo de ataque de cero grados donde se obtiene un  $C_L$  de 0,14 y un  $C_D$  de 0,046



**Figura 3.11.** Visualización de valores de coeficientes aerodinámicos  
(Fuente: Autor)

En el informe de la NACA se encuentran los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación para una serie de ángulos de ataque, dichos valores son leídos de la gráfica correspondiente al perfil 0012 para luego ser separados y enlistados en la Tabla 3.3 y a la vez

comparados con los obtenidos en la experimentación. Los valores de experimentación son un promedio de diez medidas tomadas en cada ángulo de ataque del perfil aerodinámico.

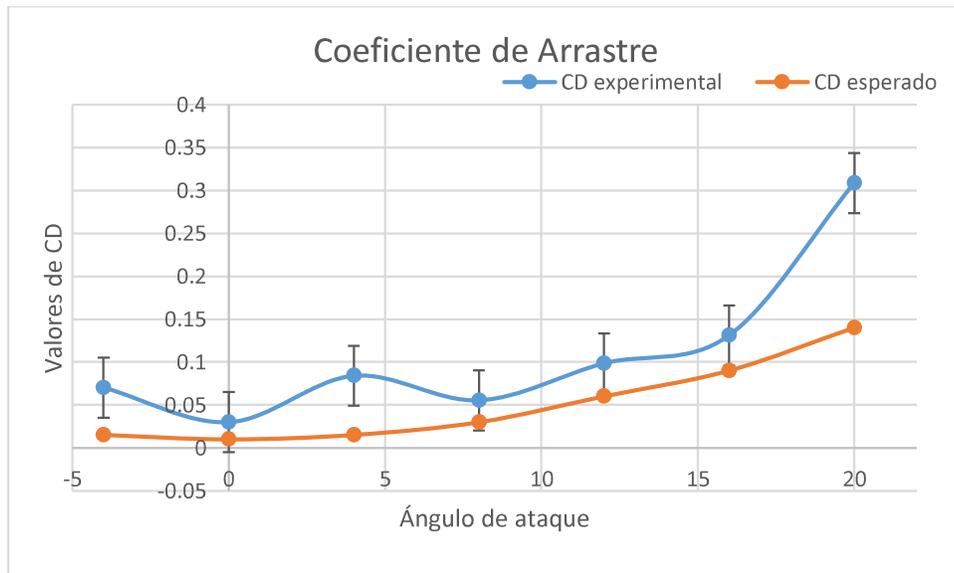
La Tabla 3.3 muestra los valores esperados y obtenido tanto para coeficiente de sustentación como de arrastre, además se calcula el error existente entre dichas medidas. El error máximo generado en el coeficiente de arrastre es de 75%, mientras que en el de sustentación de 93%

**Tabla 3.3.** Valores experimentales, esperados y porcentaje de error

ángulo	CD NACA	CD exp	Error (%)	CL NACA	CL exp	Error (%)
-4	0.02	0.07	71	-0.3	-0.02	93
0	0.01	0.03	67	0	0	0
4	0.02	0.08	75	0.3	0.14	53
8	0.03	0.06	50	0.6	0.15	75
12	0.06	0.10	40	0.9	0.26	71
16	0.09	0.13	31	1.2	0.32	73
20	0.14	0.31	55	1.45	0.4	72

(Fuente: Autor)

Aunque los porcentajes de variación (error) son altos, no son totalmente concluyente en el estudio de verificación de desempeño, debido a que es necesario comparar las gráficas que generan dichos valores incluyendo las respectivas incertidumbres que posee cada valor.



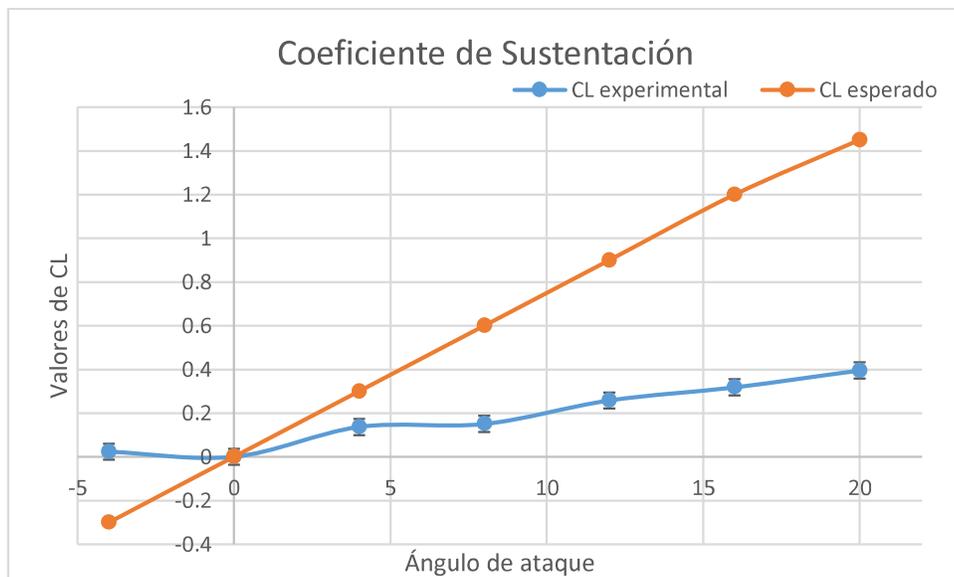
**Figura 3.12.** Coeficiente de Arrastre.

(Fuente: Autor)

La Figura 3.11 representa las gráficas de los valores de coeficiente de arrastre vs el ángulo de ataque, la curva de color azul muestra los datos obtenidos mediante las pruebas realizadas por el prototipo construido con sus respectivos valores de incertidumbre, mientras que la gráfica de color tomate es la representación de los valores esperados obtenidos del reporte 460 de la NACA.

Mediante análisis de la gráfica se puede constatar que existen tres puntos que se encuentran fuera de la región de incertidumbre, que se constituirían en valores que poseen una variación significativa a los valores esperados, pero el sistema se encuentra trabajando de manera adecuada ya que mantiene la tendencia de la curva y la mayoría de los valores se encuentran dentro de los intervalos de incertidumbre.

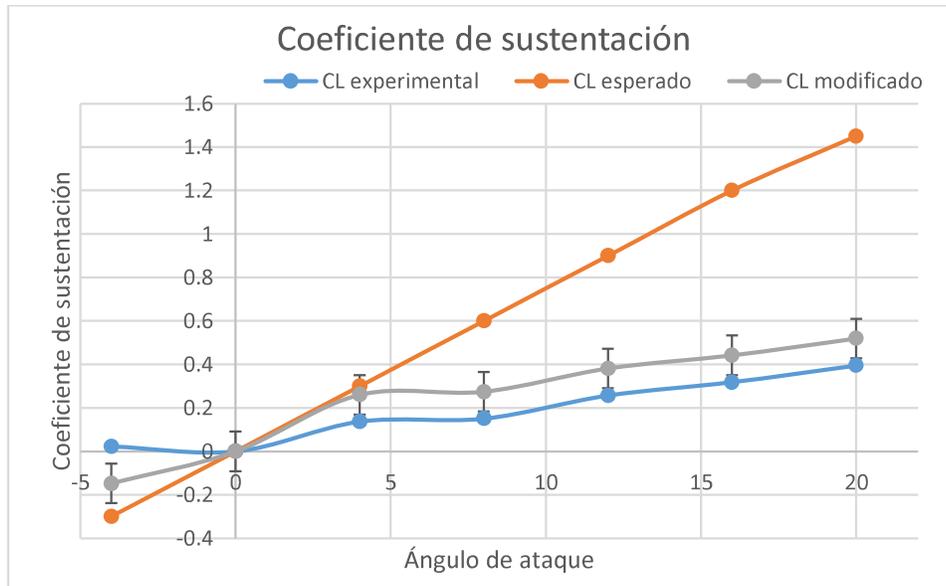
Para verificar el funcionamiento del coeficiente de sustentación también se realiza su gráfica representada por la Figura 3.12



**Figura 3.13.** Coeficiente de Sustentación.  
(Fuente: Autor)

Al igual que en el apartado anterior, la figura 3.12 cuenta con una gráfica azul que muestra la curva formada por los datos obtenidos por el prototipo, y la de color tomate representa los valores esperados de catálogo. Las diferencias son notorias entre los valores esperados y experimentales, siendo el peso de la barra de soporte una de las principales causas, por lo cual, se realizará un análisis de los datos disminuyendo teóricamente el peso de la barra, es así que se procedió a multiplicar los valores de los coeficientes de sustentación experimentales

por el área de estudio y la presión dinámica y a dicho valor resultante se suma el valor del peso de la barra, y el valor obtenido se vuelve a dividir para el área y la presión dinámica.



**Figura 3.14.** Coeficientes de sustentación experimental, esperado y modificado

La Figura 3.14 incluye la gráfica de los valores de sustentación obtenidos mediante el proceso descrito anteriormente donde teóricamente se realiza un ajuste por el peso de la barra, la misma que disminuye diferencias, pero aun muestra diferencias significativas con las esperadas.

Debido a las variaciones se hace necesario analizar las posibles causas que generan dichas variaciones y posibles mejoras a realizar.

Dentro de las causas detectadas que afectan directamente en los resultados obtenidos se destacan:

1. La barra que transmite la fuerza de sustentación se encuentra fabricada en acero, por lo que su peso es un factor que posiblemente altere las mediciones de la fuerza de sustentación, ya que dicha fuerza se encuentra influenciada directamente al peso del elemento.
2. El ensayo no garantiza repetitividad debido a la presencia de vibración excesiva en el túnel de viento. Aunque el valor experimental tomado fue el promedio de 10 medidas realizadas en cada ángulo de ataque, no garantiza ser el valor más representativo ya

que cada valor tuvo una variación significativa con su antecesor. Es así que, se hace obligatoria la incorporación del anclaje faltante en el túnel de la facultad.

3. La existencia de recirculación de aire en el túnel de viento contamina los valores obtenidos en el estudio aerodinámico, esto se produce por la incorrecta ubicación del túnel. Dicho fenómeno podrá ser eliminado con el cambio de lugar del túnel a un lugar donde no se encuentre objetos que obstaculicen la entrada y salida del flujo.
4. Es necesario modificar el proceso de construcción del perfil aerodinámico, ya que la impresión 3D no garantiza una total precisión geométrica. Este problema se identificó al momento de inspeccionar el elemento de pruebas y notar que las aristas de entrada y salida de aire no se encuentran completamente perpendiculares.

Los factores citados anteriormente tienen una gran influencia en el estudio, razón por la cual a pesar de los altos valores de error y variación no se puede concluir una ineficiencia del modelo, pues primero se debe resolver las inadecuadas condiciones y volver a repetir las pruebas. En el cual proyecto durante en las pruebas se realizaron cambios y mejoras, pero los citados anteriormente no es posible realizarlos ya que conlleva permisos por parte de la universidad y en especial cambios radicales y demorados.

## 4. CONCLUSIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se realizó una recopilación bibliográfica del estado del arte de los sistemas de instrumentación utilizados para la obtención de fuerzas aerodinámicas en los túneles de viento de ciclo abierto. Principalmente estos sistemas trabajan con balanzas aerodinámicas de disposición lateral, es por esta razón que existen varios prototipos y estudios experimentales sobre estos elementos, pero en el caso de las balanzas con acople inferior los estudios realizados son muy escasos.
- Mediante el estudio realizado se diseñó un prototipo de balanza aerodinámica de acople inferior para ser montada sobre una base de acrílico que permita realizar mediciones de las fuerzas aerodinámicas que influyen en el sistema.
- Se seleccionó y determinó los elementos necesarios para el sistema, las celdas de carga fueron seleccionados en base a los valores máximos teóricos de las fuerzas aerodinámicas, siendo las celdas de carga LCM-703 las más adecuadas que soportan una masa máxima de 10 lb, además para la adquisición se seleccionó una tarjeta DAQ NI-USB 6009, y para el circuito de amplificación los integrados AD620.
- Se implementó una balanza aerodinámica que permite la medición de fuerzas y determinación de los coeficientes de arrastre y sustentación
- Se verificó el desempeño del prototipo mediante la determinación del porcentaje de error, la determinación del valor de incertidumbre, y la comparación de las gráficas de valores obtenidos con el reporte 460. Y de esta manera el prototipo entrega un valor de incertidumbre 0.0359, un porcentaje de error máximo de 75% en el coeficiente de arrastre y de 93% en el coeficiente de sustentación.

## 4.2. Trabajos Futuros

El actual proyecto es una opción viable de modelo de balanza aerodinámica, por lo que es indispensable continuar con el trabajo para mejorar los resultados obtenidos. En primera instancia se sugiere realizar los cambios indicados a continuación que son potenciales soluciones a los problemas citados en la parte final del capítulo tres de pruebas del presente documento.

- Diseñar y construir una estructura de bancada para la balanza que disminuya las vibraciones producidas por los ventiladores, ya que influyen en un alto índice en la toma de resultados de las fuerzas aerodinámicas.
- Reubicar el túnel de viento para evitar la recirculación del flujo de aire, tomando en cuenta las recomendaciones del fabricante que son: cuatro metros de espacio libre para la toma de aire y dos metros de salida libre a partir de la zona de desahogo.

En segundo lugar, una vez realizados los cambios del apartado anterior y en caso de mantenerse altos los valores de error se sugiera las siguientes medidas

- Utilizar un método diferente de fabricación del alabe sujeto a estudio, que garantice condiciones de paralelismo y perpendicularidad, y además cuente con un acabado superficial adecuado que no afecte el estudio aerodinámico.
- Sustituir los elementos del circuito de amplificación y acople de impedancias con integrados de alta precisión.
- Cambiar el material de la barra de acople principal a un material más ligero. En el actual trabajo el único elemento fabricado en acero es la barra que se une con la base del elemento de estudio y transmite la fuerza a la celda de sustentación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, M. Á., Astiz, V., Ferrandez, H. M., & Meronluc, M. (25 de Octubre de 2016). Desarrollo de Balaza Externa para Túnel de Viento. *Universidad Tecnológica Nacional*, 90-91. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de [rtyc.utn.edu.ar > index.php > rtyc > article > download](http://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/download)
- Airfoil Tools. (2019). *Airfoiltools*. Recuperado el 16 de Octubre de 2019, de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il&fbclid=IwAR01xhxVBG-gPSyT54JirvpxGB8q-DoUQ9vkUfMfdZG0xA1rpa3OY9Y2NEs>
- Anónimo. (20 de Noviembre de 2010). *F1aldia*. Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de <https://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>
- Anónimo. (s.f.). *BticoGeek*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2019, de <https://tienda.bricogeek.com/arduino/305-arduino-uno.html>
- Anónimo. (s.f.). *electronperdido*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2019, de <https://electronperdido.com/shop/sensores/fuerza/celda-de-carga-5kg/>
- Arduino uno*. (26 de 11 de 2019). Obtenido de [https://cdn-tienda.bricogeek.com/2827-thickbox\\_default/arduino-uno.jpg](https://cdn-tienda.bricogeek.com/2827-thickbox_default/arduino-uno.jpg)
- Argumosa, M. P. (s.f.). *Transporte inteligente, ecológico e integrado*. INSTITUO NACIONAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL, Área de Energías Renovables. Recuperado el 20 de Agosto de 2019, de <http://www.logistop.org/attachments/article/890/INTA.pdf>
- Artisan Technology Group. (2012). *USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI USB-6008/6009*. Guia de Usuario, NATIONAL INSTRUMENTS. Recuperado el 25 de Septiembre de 2019, de <https://www.artisanng.com/info/ATG5kc9y.pdf>
- Artisan Technology Group. (2012). *USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI USB-6008/6009*. National Instruments. Recuperado el 29 de Septiembre de 2019, de <https://www.artisanng.com/info/ATG5kc9y.pdf>
- Avendaño Calvillo, D. I. (2011). *Investigación sobre Perfiles Aerodinámios de Aeronaves Utilitarias para un Rango Amplio de Operaciones. (Tesis de Pregrado)*. Instituto Politécnico Nacional, Ingeniería Aeronáutica, México. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de

<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12093/1767%202012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Colomar Lix, G. (2012). *Medios de propulsión eólica alternativos a la vela tradicional*. FACULTAD DE NAÚTICA DE BARCELONA, Licenciatura en Náutica y Transporte Marítimo, Barcelona. Recuperado el 28 de Agosto de 2019, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/15987/PFC%20Medios%20de%20propulsi%C3%B3n%20e%C3%B3lica%20alternativos%20a%20la%20vela%20tradicional.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (1998). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (Quinta ed.). (I. Prentice Hall, Trad.) México: Prentice Hall Hispanoamericana. S.A. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vGqE52oO2BQC&oi=fnd&pg=PR27&dq=amplificadores+operacionales&ots=148OsV8SUB&sig=bmNDVMgcCg1nLTIT9SyER7\\_6CUQ#v=onepage&q&f=true](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=vGqE52oO2BQC&oi=fnd&pg=PR27&dq=amplificadores+operacionales&ots=148OsV8SUB&sig=bmNDVMgcCg1nLTIT9SyER7_6CUQ#v=onepage&q&f=true)

Dominguez, M. (27 de Mayo de 2010). *Amplificador Operacional (Artículo de Blog)*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de <http://amplificadoroperacional.blogspot.com/2010/05/estructura-interna-del-741.html>

F. Wolfendale, P. C. (25 de Febrero de 1986). United States Patent. *AUTOMATIC SYSTEMS LABORATORIES Ltd*, 1-8. Recuperado el 15 de Septiembre de 2019, de <https://patentimages.storage.googleapis.com/ba/80/dc/1c68f3b0769af3/US4572006.pdf>

Fergusson Harleman, D. R., & Wallace Daily, J. (1975). *Dinámica de los fluidos con aplicaciones en ingeniería*. México, México: Trillas. Recuperado el 12 de Agosto de 2019, de <https://es.calameo.com/read/000304434f40d100c7638>

Hussain Hadwan, H. (Abril de 2016). Smart HomeControl by using Raspberry Pi & Arduino UNO. *International Journal of Advance Research in Computer and Communication Engineering*, 1-6. Recuperado el 24 de Septiembre de 2019, de [https://www.researchgate.net/profile/Hamid\\_Hadwan/publication/330076104\\_IJARCC\\_E/links/5c2bea2d458515a4c7065d12/IJARCCCE.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hamid_Hadwan/publication/330076104_IJARCC_E/links/5c2bea2d458515a4c7065d12/IJARCCCE.pdf)

Instruments, N. (26 de 11 de 2019). *National Instruments*. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr.html>

Instruments, N. (s.f.). *Artisan Technology Group*. Recuperado el 25 de Septiembre de 2019, de [https://www.artisanng.com/TestMeasurement/82028-1/National\\_Instruments\\_USB\\_6009\\_14\\_Bit\\_Multifunction\\_DAQ\\_USB\\_Device?trackingID=11a6k&matchtype=b&keyword=&adpos=1t1&m=&s=T&c=&n=g&placement=&adid=19615236845&gclid=Cj0KCQjw\\_absBRD1ARIsAO4\\_D3tDcn4WS6GtRfLk3xQ](https://www.artisanng.com/TestMeasurement/82028-1/National_Instruments_USB_6009_14_Bit_Multifunction_DAQ_USB_Device?trackingID=11a6k&matchtype=b&keyword=&adpos=1t1&m=&s=T&c=&n=g&placement=&adid=19615236845&gclid=Cj0KCQjw_absBRD1ARIsAO4_D3tDcn4WS6GtRfLk3xQ)

INSTRUMENTS, N. (s.f.). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019, de [https://www.artisanng.com/info/PDF\\_\\_4E495F634441515F393137325F557365725F4775696465.pdf](https://www.artisanng.com/info/PDF__4E495F634441515F393137325F557365725F4775696465.pdf)

INSTRUMENTS, N. (s.f.). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019, de [http://www.ni.com/pdf/manuals/374068a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374068a_02.pdf)

INSTRUMENTS, N. (s.f.). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019, de <https://www.ni.com/es-cr/support/model.ni-9205.html>

INSTRUMENTS, N. (s.f.). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019, de [http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf)

McCormick, Phd, B. W. (1926). *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*. (Vol. Segundo). (J. W. Inc., Trad.) United States of America: John Wiley & Sons. Inc. Recuperado el 15 de Octubre de 2019, de <http://docshare01.docshare.tips/files/9792/97922256.pdf>

Morris, M. (2010). *FORCE BALANCE DESIGN FOR EDUCATIONAL WIND TUNNELS*. *American Society for Engineering Education*.

Muñoz Mejiás, A. (2012). *Diseño y analisis computacional para túnel de viento de baja velocidad (Tesis de Pregrado)*. Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Nacional, INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA, Madrid. Recuperado el 13 de Agosto de 2019, de <http://hdl.handle.net/10016/15901>

OMEGA. (s.f.). *Omega*. (C. d. doble, Productor) Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://es.omega.com/pptst/LCM202.html>

OMEGA. (s.f.). *Omega*. (H. P. Protected, Productor) Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://es.omega.com/pptst/LCMCD.html>

OMEGA. (s.f.). *OMEGA*. Recuperado el 21 de Octubre de 2019, de <https://www.omega.com/en-us/sensors-and-sensing-equipment/load-and-force/load-cells/lcm703/p/LCM703-75?fbclid=IwAR3Xlhw6gxvnDNRF3h8AJBIWYsbVAOkncTsWKKzqrD22pvphCI7Yf7OMyvk>

OMEGA. (s.f.). *OMEGA*. Recuperado el 21 de Octubre de 2019, de <https://assets.omega.com/pdf/test-and-measurement-equipment/load-and-force/load-cells/LCM703.pdf>

OMEGA. (s.f.). *OMEGA*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html>

Padilla Benítez, M. A. (2015). *Creación de tunel de viento a escala 1:18 que indique flujo de aire sobre objetos, en especial vehículos, para fomentar el estudio de la aerodinámica*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL, FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, Quito. Recuperado el 28 de Agosto de 2019, de <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/14022>

Padrón González, J. (2012). *Instrumentación, adquisición de datos para laboratorio multidisciplinar y motorización de bomba manual de mecate*. Tesis de Pregrado, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR, Ingeniería Térmica y de Fluidos, Madrid. Recuperado el 18 de Septiembre de 2019, de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14693/PFC\\_Javier\\_Padron\\_Gonzalez.pdf?sequence=1](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14693/PFC_Javier_Padron_Gonzalez.pdf?sequence=1)

paosoler05. (18 de Noviembre de 2015). *¿Cómo se mantienen los aviones en el aire?* Recuperado el 15 de Septiembre de 2019, de <http://fisica2-aerodinamica.blogspot.com/2015/11/porque-se-mantienen-en-el-aire-por.html>

Paz Pinzón, S. (9 de Agosto de 2013). El Perfil Alar y su Nomenclatura NACA. (S. O. Aeronáutica, Ed.) *Ciencia poder aéreo*, 1-13. Recuperado el 16 de Octubre de 2019, de <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/4>

- Pérez Morales, C. J. (2011). *Monitoreo y adquisición de datos de un motor de corriente directa de imanes permanentes*. Tesina , Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, México D.F. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/14474/1/SEPI-ESIME-UA.pdf>
- Pinheiro Fernandes, J. T. (2018). *Design of a Wind Tunnel Force Balance*. Técnico Lisboa, Ingeniería Aeroespacial, Lisboa. Recuperado el 26 de Agosto de 2019
- Pinheiro Fernandes, J. T. (2018). *Design of a wind tunnel force balance (Tesis de Post grado)*. Técnico Lisboa, Lisboa. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126518382191146/JoaoFernandes\\_ExtendedAbstract.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126518382191146/JoaoFernandes_ExtendedAbstract.pdf)
- R. Nave, M. O. (s.f.). *hyperphysics*. Recuperado el 26 de Agosto de 2019, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/hyst.html>
- Ramírez Cruz, J. A., & Conde Calderon, Ó. (2012). *Diseño, Modelado y Análisis de un Sistema de Sujeción de la Toma de Aire y Reversa del Avión BOING 727 (Tesina)*. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad TICOMÁN, Mexico, D.F. Recuperado el 20 de Octubre de 2019, de <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/12113>
- Rubia Mena, J. A. (1 de Diciembre de 2000). *Redeya*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de <http://redeya.bytemaniacos.com/electronica/tutoriales/adatos/adquisicion.html>
- Sánchez López, J. M. (2017). Diseño de una balanza para túnel de viento subsónico. *Universidad Politécnica de Valencia*, 39. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/88163/S%C3%81NCHEZ%20-%20Dies%C3%B1o%20de%20una%20balanza%20para%20t%C3%BAnel%20de%20viento%20subs%C3%B3nico.pdf?sequence=1>
- Sestak, T. A. (2015). *Development of a Robust Wind Tunnel Balance for Wingsuit Aerodynamic Testing*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de

[https://pdfs.semanticscholar.org/32f1/ebfb09f33c794a68c86ab4e84955dd85141b.pdf?\\_ga=2.79525588.1154575095.1573233247-2130640404.1573233247](https://pdfs.semanticscholar.org/32f1/ebfb09f33c794a68c86ab4e84955dd85141b.pdf?_ga=2.79525588.1154575095.1573233247-2130640404.1573233247)

TECQUIPMENT LTD. (s.f.). *THREE COMPONENT BALANCE*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019, de <https://www.tecquipment.com/af1300-three-component-balance>

Topa Chuquitarco, C. P. (2017). *Análisis de Instrumentación y Simulación de un Túnel de Viento Subsónica de Ciclo Abierto (Tesis Postgrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito. Recuperado el 7 de Octubre de 2019, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19133/1/CD-8518.pdf>

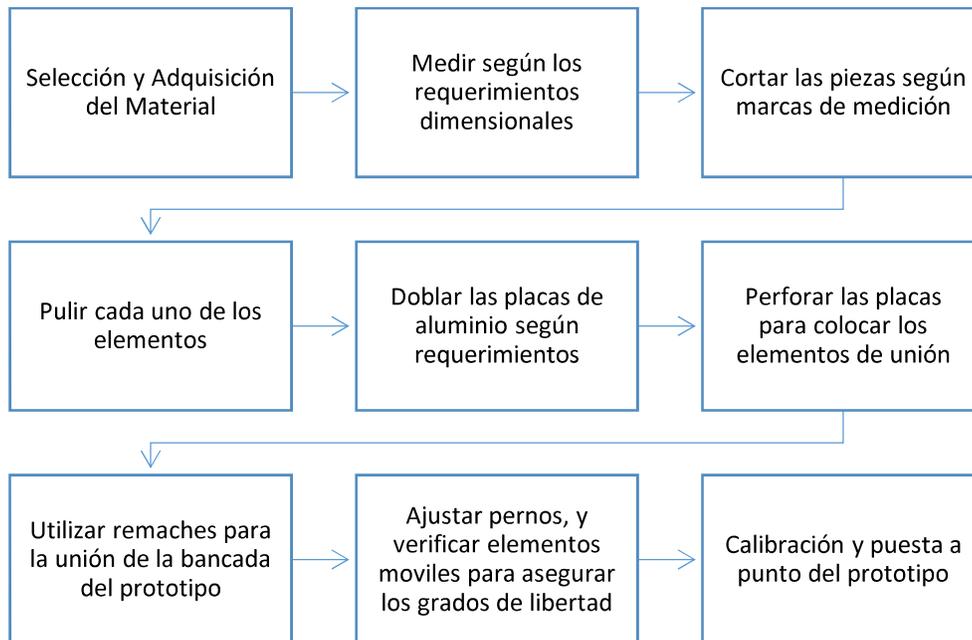
Torrente Artero, Ó. (2013). *ARDUINO Curso práctico de formación*. Madrid: RC. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019, de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=6cZhDmf7suQC&oi=fnd&pg=PR15&dq=arduino&ots=A\\_eGjXPCEJ&sig=N6hyUtyk7J\\_22tH5fttbXZbK0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=6cZhDmf7suQC&oi=fnd&pg=PR15&dq=arduino&ots=A_eGjXPCEJ&sig=N6hyUtyk7J_22tH5fttbXZbK0#v=onepage&q&f=false)

## ANEXOS

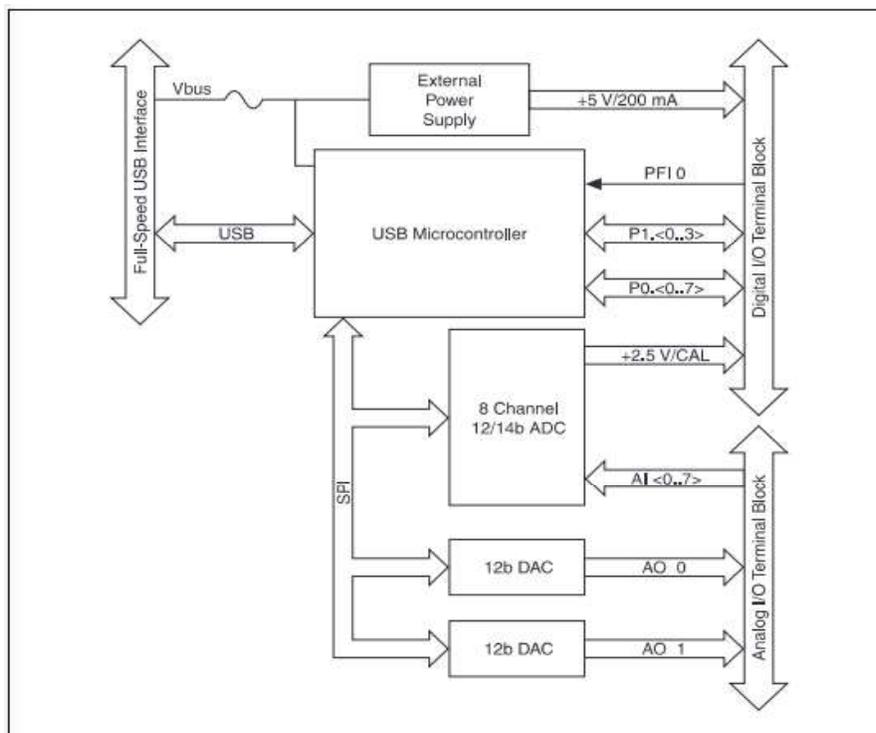
### Anexo i: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ARDUINO UNO R3.

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de Entrada (recomendado)	7 – 12 V
Voltaje de Entrada (limite)	6 – 20 V
Pines Digitales I/O	14 ( de los cuales 6 proporcionan a la salida PWM)
PWM Pines Digitales I/O	6
Pines de entrada analógica	6
Corriente directa por pin I/O	20 mA
Corriente directa por Pin de 3,3 V	50 mA
Flash memory	32 KB (ATmega328P) De los cuales 0,5 KB son usados por el cargador de arranque
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad del reloj	16 MHz
Largo	68,6 mm
Ancho	53,4 mm
Peso	25 g

## Anexo ii: DIAGRAMA DE OPERACIONES PARA CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO



## Anexo iv: DIAGRAMA DE BLOQUES NI-USB 6009.



## Anexo v: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS NI-USB 6009.

Precisión absoluta a escala completa, un solo extremo				
Rango	Típico a 25 °C (mV)	Sobre Temperatura máxima (mV)		
± 10	14,7	138		
Presión absoluta a escala completa				
Rango	Típico a 25 °C (mV)	Sobre Temperatura máxima (mV)		
± 20	14,7	138		
±10	7,73	84,8		
±5	4,28	58,4		
±4	3,59	53,1		
±2,5	2,56	45,1		
±2	2,21	42,5		
±1,25	1,70	38,9		
±1	1,53	37,5		
Niveles de lógica digital				
Nivel		Min	Max	Units
Voltaje mínima de entrada		-0,3	0,8	V
Voltaje máximo de entrada		2,0	5,8	V
Corriente de fuga de entrada		-----	50	µA
Voltaje mínima de salida (I = 8,5 mA)		-----	0,8	V
Voltaje máximo de salida				
Accionamiento activo (push-pull), I=-8,5 mA		2,0	3,5	V
Colector abierto (open-drain), I=-0,6 mA, nominal		2,0	5,0	V
Colector abierto (open-drain), I=-8,5 mA, con resistencia externa		2,0	-----	V
Características Físicas				
Dimensiones				
Sin conectores		6,35 cm x 8,51 cm x 2,31 cm		
Con conectores		8,18 cm x 8,51 cm x 2,31 cm		

### Anexo iii: DESCRIPCIÓN DE LOS PINES Y SEÑALES DE UNA NI-USB 6009.

Nombre de la Señal	Referencia	Dirección	Descripción
GND	-----	-----	Masa
AI <0..7>	Varia	Input	Canales de entrada analógica 0 a 7
AO <0. 1>	GND	Output	Canales analógicos de salida 0 a 1
PO. <0..7	GND	Input or Output	Puerto digital 0 Canales E/S 0 a 7
PI. <0...3>	GND	Input or Output	Puerto digital 1 Canales E/S 0 a 3
PFI 0	GND	Input	Este pin es configurable como un disparador digital o una entrada de contador de eventos.
+2.5 V	GND	Output	Referencia externa.- Provee una referencia de prueba de recuperación
+5 V	GND	Output	Fuente de alimentación.- Proporciona + 5V de potencia hasta 200mA

**Anexo ivii: BASE DE DATOS DE COORDENADAS DEL PERFIL AERODINÁMICO  
NACA 0012**

NACA 0012 AIRFOILS	
66.	66.
0.0000000	0.0000000
0.0005839	0.0042603
0.0023342	0.0084289
0.0052468	0.0125011
0.0093149	0.0164706
0.0145291	0.0203300
0.0208771	0.0240706
0.0283441	0.0276827
0.0369127	0.0311559
0.0465628	0.0344792
0.0572720	0.0376414
0.0690152	0.0406310
0.0817649	0.0434371
0.0954915	0.0460489
0.1101628	0.0484567
0.1257446	0.0506513
0.1422005	0.0526251
0.1594921	0.0543715
0.1775789	0.0558856
0.1964187	0.0571640
0.2159676	0.0582048
0.2361799	0.0590081
0.2570083	0.0595755
0.2784042	0.0599102
0.3003177	0.0600172
0.3226976	0.0599028
0.3454915	0.0595747
0.3686463	0.0590419
0.3921079	0.0583145
0.4158215	0.0574033
0.4397317	0.0563200
0.4637826	0.0550769
0.4879181	0.0536866
0.5120819	0.0521620
0.5362174	0.0505161
0.5602683	0.0487619
0.5841786	0.0469124
0.6078921	0.0449802
0.6313537	0.0429778
0.6545085	0.0409174
0.6773025	0.0388109
0.6996823	0.0366700

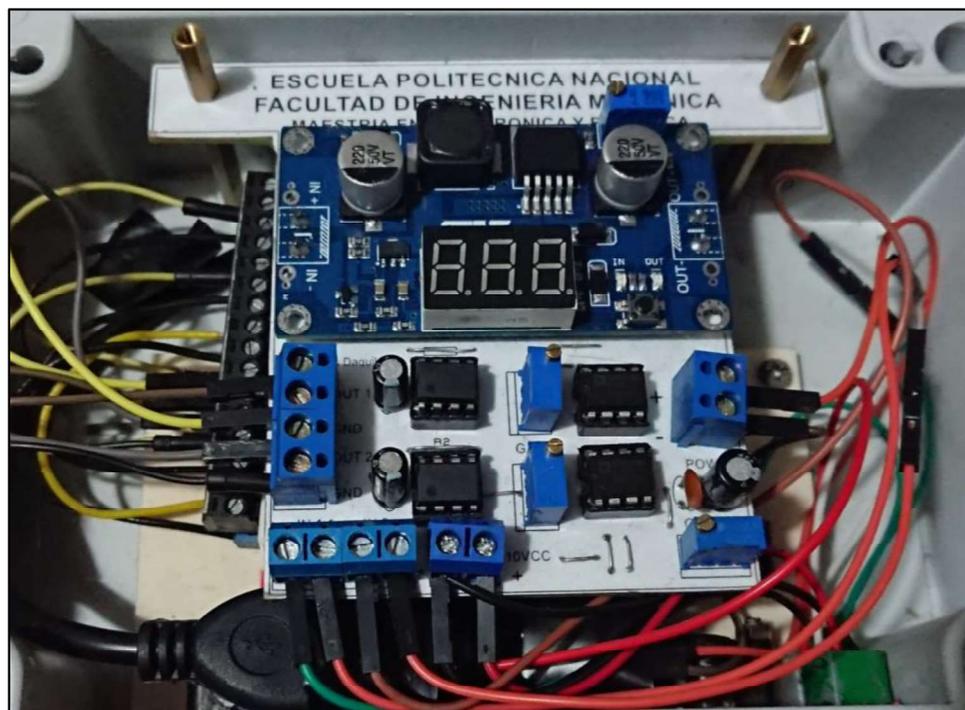
0.7215958	0.0345058
0.7429917	0.0323294
0.7638202	0.0301515
0.7840324	0.0279828
0.8035813	0.0258337
0.8224211	0.0237142
0.8405079	0.0216347
0.8577995	0.0196051
0.8742554	0.0176353
0.8898372	0.0157351
0.9045085	0.0139143
0.9182351	0.0121823
0.9309849	0.0105485
0.9427280	0.0090217
0.9534372	0.0076108
0.9630873	0.0063238
0.9716559	0.0051685
0.9791229	0.0041519
0.9854709	0.0032804
0.9906850	0.0025595
0.9947532	0.0019938
0.9976658	0.0015870
0.9994161	0.0013419
1.0000000	0.0012600
0.0000000	0.0000000
0.0005839	-.0042603
0.0023342	-.0084289
0.0052468	-.0125011
0.0093149	-.0164706
0.0145291	-.0203300
0.0208771	-.0240706
0.0283441	-.0276827
0.0369127	-.0311559
0.0465628	-.0344792
0.0572720	-.0376414
0.0690152	-.0406310
0.0817649	-.0434371
0.0954915	-.0460489
0.1101628	-.0484567
0.1257446	-.0506513
0.1422005	-.0526251
0.1594921	-.0543715
0.1775789	-.0558856
0.1964187	-.0571640
0.2159676	-.0582048

0.2361799	-.0590081
0.2570083	-.0595755
0.2784042	-.0599102
0.3003177	-.0600172
0.3226976	-.0599028
0.3454915	-.0595747
0.3686463	-.0590419
0.3921079	-.0583145
0.4158215	-.0574033
0.4397317	-.0563200
0.4637826	-.0550769
0.4879181	-.0536866
0.5120819	-.0521620
0.5362174	-.0505161
0.5602683	-.0487619
0.5841786	-.0469124
0.6078921	-.0449802
0.6313537	-.0429778
0.6545085	-.0409174
0.6773025	-.0388109
0.6996823	-.0366700
0.7215958	-.0345058
0.7429917	-.0323294
0.7638202	-.0301515
0.7840324	-.0279828
0.8035813	-.0258337
0.8224211	-.0237142
0.8405079	-.0216347
0.8577995	-.0196051
0.8742554	-.0176353
0.8898372	-.0157351
0.9045085	-.0139143
0.9182351	-.0121823
0.9309849	-.0105485
0.9427280	-.0090217
0.9534372	-.0076108
0.9630873	-.0063238
0.9716559	-.0051685
0.9791229	-.0041519
0.9854709	-.0032804
0.9906850	-.0025595
0.9947532	-.0019938
0.9976658	-.0015870
0.9994161	-.0013419
1.0000000	-.0012600

**Anexo vii: DATOS TÉCNICOS DE LA CELDA DE CARGA OMEGA DE BAJO PERFIL.**

Especificaciones		
Excitación	10 Vdc (15 Vmax)	
Salida	2 mV/V nominal	
5 Puntos de Calibración	0%, 50%, 100%, 50%, 0%	
Linealidad	10 a 100 lb	±0,15%
	>100 lb	±0,10 FSO
	5 a 50 Kgf	±0,15%
	75 a 500 Kgf	±0,10%
Rango de temperatura en funcionamiento	-40 a 82°C (-40 a 180°F)	
Rango de compensación de temperatura	16 a 71°C (60 a 160°F)	
Seguridad de sobre carga	150% de capacidad	
Sobre carga máxima	300% de capacidad	
Resistencia de Salida	350 ± 10 Ω	
Resistencia de Entrada	360 Ω mínimo	

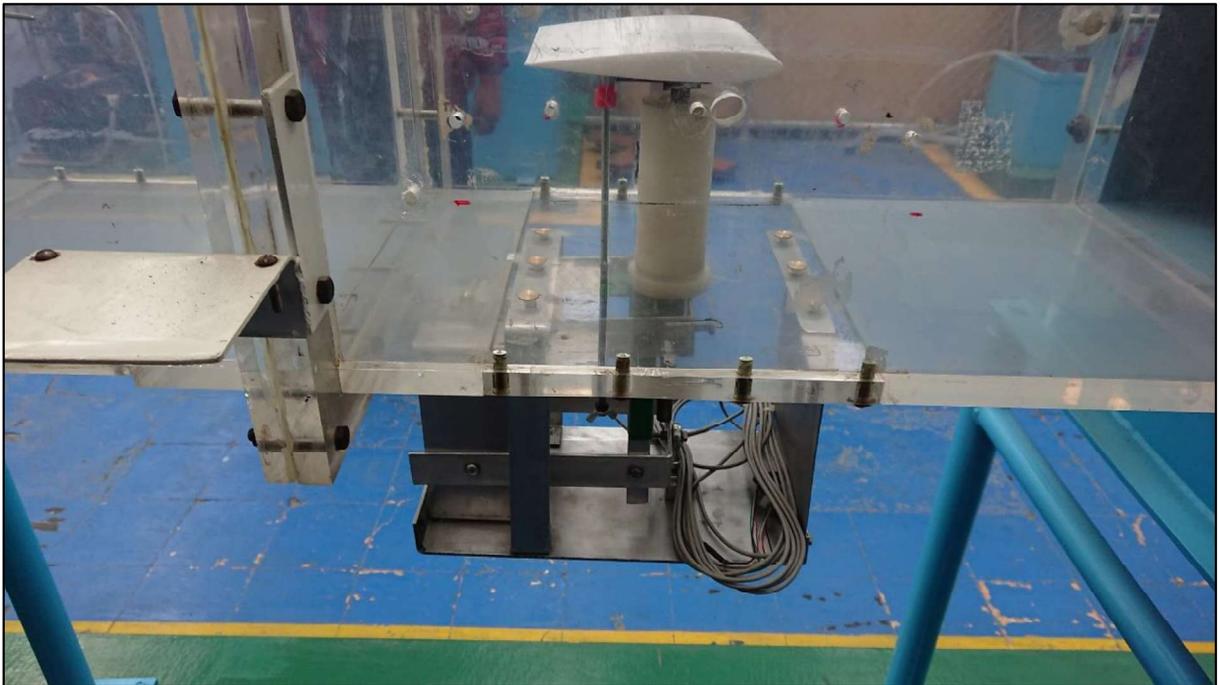
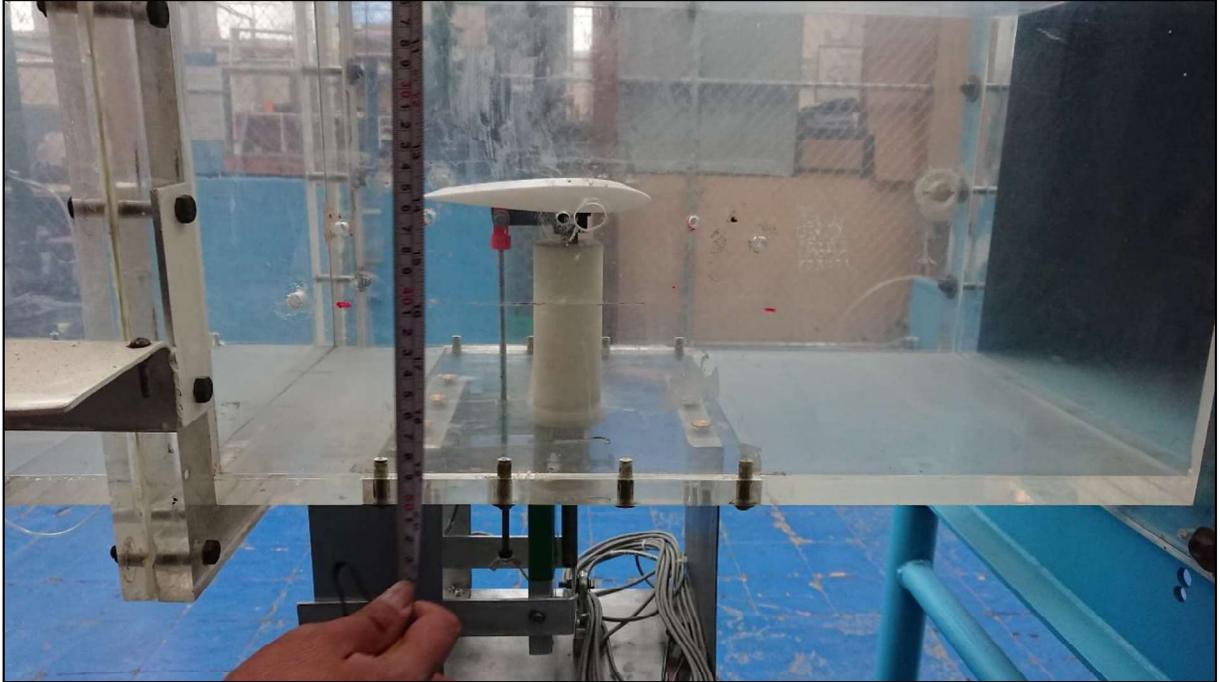
**ANEXO vix: CIRCUITO AMPLIFICADOR DE SEÑAL.**



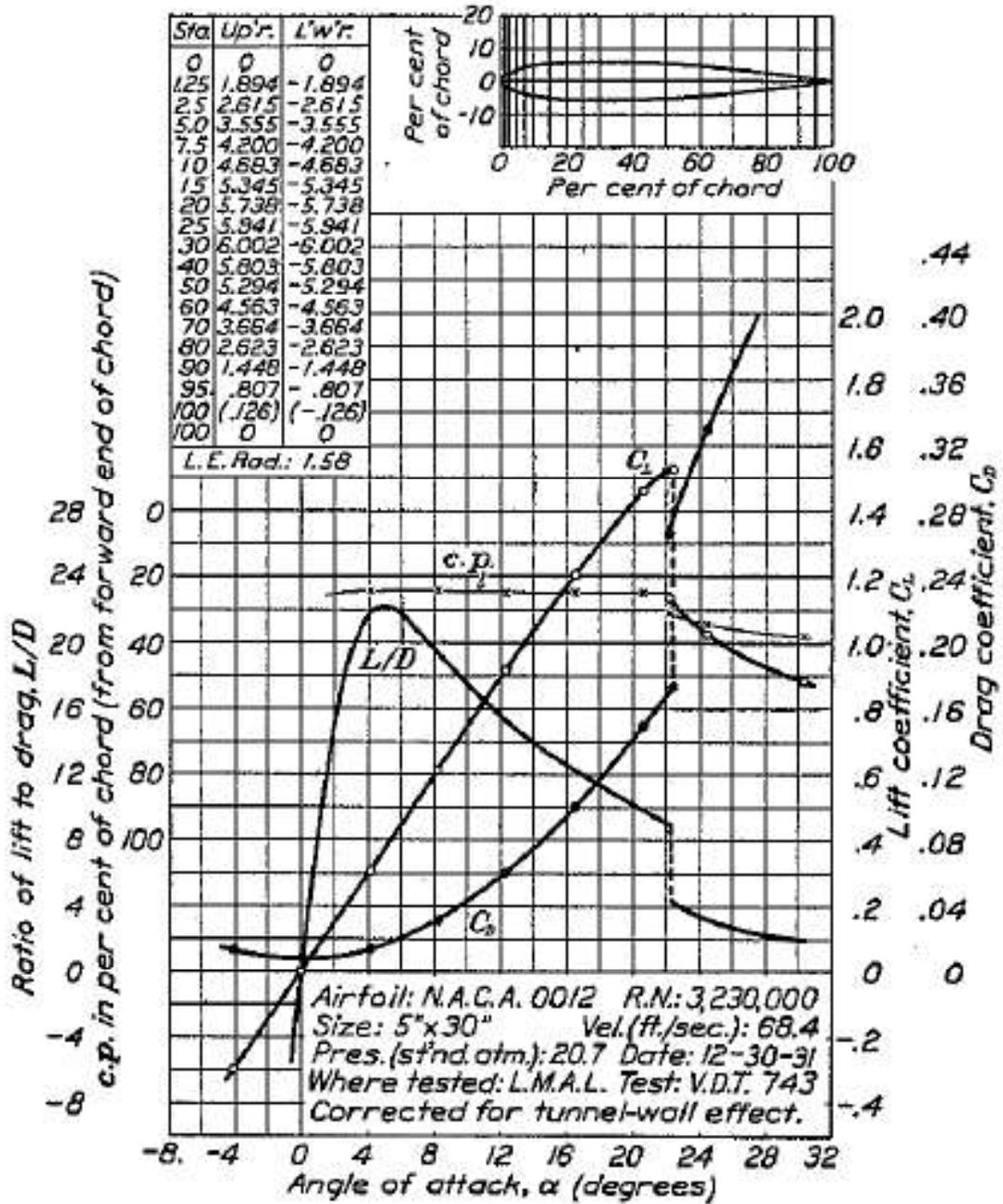
**Anexo x: CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE BALANZA AERODINÁMICA.**



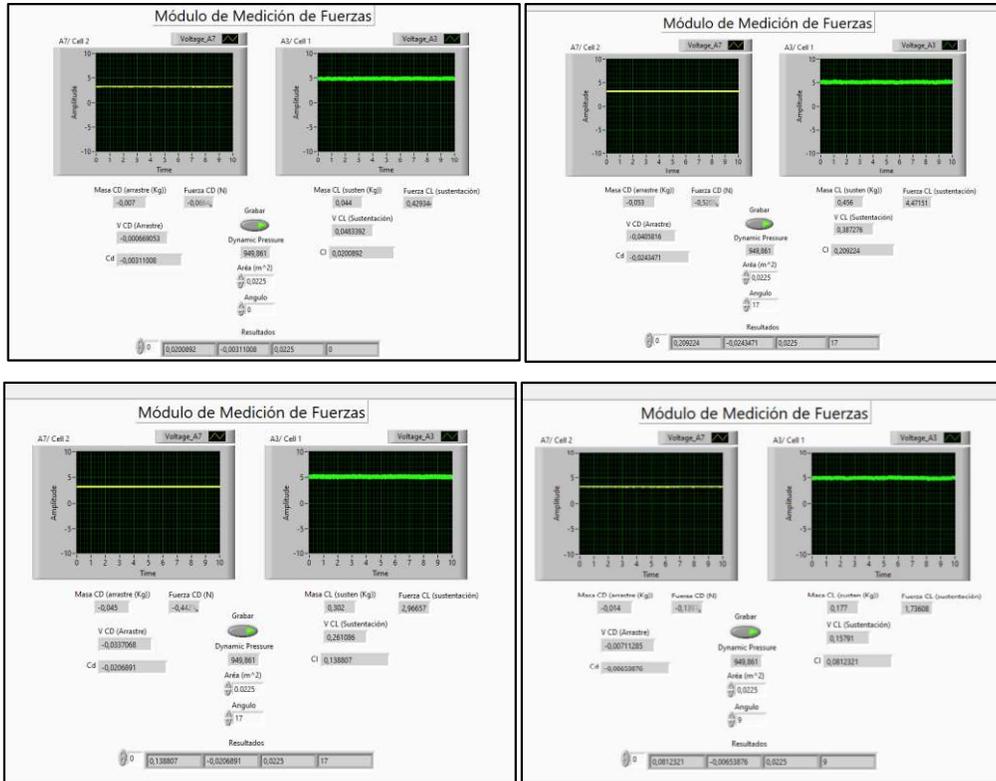
## Anexo viii: INSTALACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL PROTOTIPO



Anexo viiii: GRÁFICA DEL INFORME 460 DE LA NACA DEL PERFIL 0012.



## Anexo ixii: INTERFAZ DEL SOFTWARE DE ADQUISICIÓN DE DATOS.



**Anexo xv: DATOS OBTENIDOS DURANTE EL PROCESO DE PRUEBAS.**

-4		0		4		8		12		16		20		24	
Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl	Cd	Cl
0,046	0	0,084223	0	0,0468	0,1404	0,0468	0,1404	0,0468	0,234	0,0468	0,2807	0,14	0,4679	1,22	1,544
0,093	0	0,084223	0	0,14	0,1404	0,0468	0,1872	0,0468	0,2807	0,0468	0,3275	0,421	0,479	1,1697	1,544
0,046	0,0467	0,084223	0	0,0468	0,1404	0,0468	0,1404	0,0468	0,234	0,234	0,3743	0,14	0,4679	1,17	1,544
0,046	0	0,084223	0	0,0468	0,1302	0,0468	0,1404	0,548	0,2807	0,0936	0,3275	0,234	0,2807	1,17	1,544
0,093	0,0467	0,042111	0	0,0468	0,1404	0,0468	0,1664	0,0468	0,234	0,0468	0,3275	0,421	0,2807	1,22	1,544
0,046	0,0467	0,084223	0	0,14	0,1404	0,0968	0,1554	0,0468	0,234	0,234	0,2807	0,234	0,2807	1,1697	1,544
0,093	0,0467	0,042111	0	0,0468	0,1404	0,0468	0,1404	0,0548	0,2807	0,0468	0,3275	0,14	0,2807	1,1697	1,544
0,046	0	0,032211	0	0,0468	0,1302	0,0834	0,1404	0,0468	0,234	0,234	0,2807	0,468	0,4679	1,17	1,544
0,093	0	0,038432	0	0,14	0,1302	0,0468	0,1554	0,0468	0,2807	0,0936	0,3275	0,468	0,4679	1,22	1,544
0,093	0,0467	0,032211	0	0,14	0,1302	0,0468	0,1554	0,0548	0,2807	0,234	0,3275	0,421	0,479	1,22	1,544

**ANEXO xi: COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS VS DATOS ENTREGADOS POR EL INFORME 460.**

Ángulo	Cd	Cl
-4	0,0702	0,023395
0	0,0608191	0
4	0,08408	0,13632
8	0,05546	0,1506
12	0,09852	0,25735
16	0,13104	0,31814
20	0,3087	0,39524
24	1,18991	1,544

Ángulo	CL	CD
-4	-0,3	0,075
-2	-0,2	0,05
0	0	0,025
2	0,15	0,06
4	0,3	0,075
6	0,45	0,1
8	0,6	0,15
10	0,75	0,2
12	0,9	0,3
14	1,05	0,375
16	1,2	0,5
18	1,3	0,6
20	1,45	0,7
22	1,5	0,875
22	1,3	1,125
24	1,6	1,025
26	1,8	0,975
28	2	0,925
30		0,9

### ANEXO xiii: ANÁLISIS DEL VALOR DE INCERTIDUMBRE.

Para la determinación del valor de incertidumbre se toman los siguientes datos:

*Celda de carga:*

Peso máximo	10
Peso mínimo	-10

*Determinación del intervalo de medición.*

Intervalo de medición de peso	Peso máximo - Peso mínimo
	10 lb-(-10lb)
	20

*Cálculo de la exactitud de los sensores:*

Para la determinación de la exactitud es necesario la determinación de la tolerancia de las celdas de carga, considerando que la tolerancia es sacada de la hoja de datos de la celda y el valor de la exactitud se realiza utilizando las ecuaciones 2-3

Número de sensores	#S	2
Intervalo de medición	Imp	20
Tolerancia	T	0,15%
Cálculo de Exactitud	E	0,06

#### **Incertidumbre de los elementos electrónicos UB<sub>1</sub>**

Se determina mediante la utilización de la Ecuación 2-3 utilizando la exactitud del sensor, el número de sensores y una constante determinada.

Incertidumbre UB1	0,03464102
-------------------	------------

#### **Incertidumbre UB<sub>3</sub>**

La incertidumbre de la tarjeta de adquisición de datos es denominada UB<sub>3</sub> la misma que fue determinada con el valor de 0,034641 en un trabajo de titulación desarrollada por el Ing. Cristian Topa. Msc.

## Incertidumbre aleatoria UB2

Se determina mediante la determinación de la desviación estándar y un valor promedio de los datos obtenidos en las pruebas por el prototipo.

CL	Promedio		Desviación Estándar		Incertidumbre estándar aleatoria
Ángulo					
-4	X(-4)	0,02	S(-4)	0,025	0,008
0	X(0)	0,00	S(0)	0,000	0,000
4	X(4)	0,14	S(4)	0,005	0,002
8	X(8)	0,15	S(8)	0,015	0,005
12	X(12)	0,26	S(12)	0,025	0,008
16	X(16)	0,32	S(16)	0,030	0,009
20	X(20)	0,40	S(20)	0,099	0,031
24	X(24)	1,54	S(24)	0,000	0,000

Cd	Promedio		Desviación Estándar		Incertidumbre estándar aleatoria
Ángulo					
-4	X(-4)	0,07	S(-4)	0,02	0,01
0	X(0)	0,06	S(0)	0,02	0,01
4	X(4)	0,08	S(4)	0,05	0,02
8	X(8)	0,06	S(8)	0,02	0,01
12	X(12)	0,10	S(12)	0,16	0,05
16	X(16)	0,13	S(16)	0,09	0,03
20	X(20)	0,31	S(20)	0,14	0,05
24	X(24)	1,19	S(24)	0,03	0,01

Para el cálculo del valor total de incertidumbre se suman todos los valores de las incertidumbres calculadas previamente.

U <sub>total</sub> Cd	0,03558272	U <sub>total</sub> CL	0,03558236
	0,03559851		0,03471729
	0,03790677		0,03475722
	0,03520822		0,03506021
	0,06083274		0,03557907
	0,04497755		0,03595691
	0,05711608		0,04667894
	0,03567014		0,03471729