



Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Mecánica



Trabajo de Título

Robotización de perfil alar de forma variable
con aplicación FishBAC

Francisco Rosas Ríos

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Referente: Alex Flores M.

Profesor Correferente: Christopher Cooper V.

Panguipulli, Miércoles 01 de Julio de 2020

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primera instancia a mi familia. A mi padre Eduardo y mi madre Gabriela, por su confianza incondicional, su apoyo y preocupación por mi bienestar. Agradezco que me dieron la oportunidad de estudiar, que se preocuparon de que no me faltase nada y que siempre estuvieron ahí para exigir un poco más de lo que mi flojera quería entregar. Agradezco también a mi hermana Constanza, que con sus inmensas capacidades me desafió indirectamente a no entregarme a la mediocridad. Agradezco su compañía lejana que, aunque separados por kilómetros, siempre encuentra un buen momento para saludar y conversar. Agradezco que los años y la madurez nos convirtieron en amigos además de hermanos (y bien adentro también agradezco que nos sigamos peleando por tonteras en la casa).

Quiero agradecer enormemente a quienes me acogieron en su hogar por más de ocho años, la familia Ulzurún-Jelves. Les agradezco por cuidarme como a un hijo más y por permitirme seguir viviendo la vida familiar aún después de migrar para estudiar. Agradezco a Pedro por su cercanía y pragmatismo, pues nunca faltó el consejo aterrizado ante mis dilemas de no querer hacer la tarea. Agradezco a Agustina por llenar la figura de autoridad de la que creí escaparme cuando dejé a mi padre en el sur. Agradezco su preocupación por que fuese responsable, que no comiera sólo chatarra y que cambiara las sábanas. En fin, agradezco su amor de madre para un hijo aparecido a los 18 años. Agradezco también a mis hermanos putativos Camila, Javiera e Ignacio, quienes me aceptaron en su casa y aprendieron a vivir conmigo rondando el hogar.

Agradezco la compañía y apoyo infinito de mi polola Constanza, quien me acompañó durante el largo proceso que fue terminar esta memoria y quien siempre estuvo ahí para contradecirme cada vez que sentía que no me las podía. Gracias amor, por confiar en mis capacidades más que yo mismo y brindarme tanto amor en los años que llevamos juntos.

Se me acaba la página y no puedo dejar de agradecer a mis amigos de la vida. Entre compañeros de media y de universidad, que me alegraron las tardes desocupadas o que me ayudaron en las ocupadas. Gracias a mi familia escogida: Gregorio, Ignacio, Pablo, Juan, Pablo, Pedro, Pablo, Cueto, entre muchos. No puedo dedicarle un párrafo a cada uno porque no terminaría nunca, pero gracias por estar ahí para escapar de la rutina siempre que hubiese tiempo (y cuando no lo había también).

Quiero agradecer a mis compañeros y amigos de universidad. Especialmente a Alejandro, que fue mi compañero en todos los laboratorios y hasta en la memoria, y a Nicolás por ser un gran amigo y compañero de ir a casa. Gracias por las tardes de estudio y las tareas hechas en patota. Las risas sobre carretes pasados y el miedo compartido por los certámenes.

Finalmente debo agradecer a mi profesor guía Alex por su paciencia y ansias de innovar. A todos los académicos y paradocentes que me ayudaron a crecer como persona en estos años. En particular agradecer a Daniel, Juan y José del Laboratorio de Termofluidos que tuvieron toda la disposición para ayudarme a completar con éxito los ensayos de mi Trabajo de Título.

RESUMEN

A modo de dar solución a problemas de diseño identificados en la iteración anterior del proyecto iniciado por *Barrios*^[1], se conforma un equipo encargado de dos tareas principales:

- El diseño y construcción de un nuevo prototipo de perfil alar con aplicación de la tecnología FishBAC, realizado por *Gajardo*^[2].
- El diseño e implementación de un sistema de control sensorizado para dicha probeta, tema que se desarrollará en extenso en el presente documento.

Luego de abordar fundamentos teóricos y el estado del arte referente al control en aerogeneradores, este trabajo cubre la realización del proyecto de robotización desde la identificación del problema y la formulación de una propuesta de solución. Se detalla la metodología a utilizar para el desarrollo del trabajo, donde se plantean etapas a seguir para lograr cumplir con los objetivos planteados y dar solución al problema. Las etapas de desarrollo planteadas y tratadas corresponden a cinco:

- I. El diseño conceptual del sistema de control a implementar, donde se identifican las principales tareas que debe cumplir el sistema y se determinan módulos funcionales que las cumplan.
- II. La selección de componentes para los módulos funcionales, donde se escogen elementos que cumplan tanto con los requerimientos del sistema como con las limitaciones identificadas.
- III. El diseño detallado de los módulos funcionales, donde se describen los circuitos a implementar con los componentes seleccionados.
- IV. El ensamblaje e integración de los módulos a la probeta. Esta etapa abarca pruebas de funcionamiento y ensayos de recopilación de datos con el sistema implementado.
- V. El diseño e implementación de un sistema de control automático. Etapa que busca discernir si el sistema cuenta con la capacidad de ser utilizado como sistema autónomo en base a los datos antes recolectados.

El proyecto logra completarse hasta la etapa IV. El sistema de control es capaz de cambiar el estado de flexión de la probeta construida y de recolectar datos de presión sobre el manto del perfil flexible. Sin embargo, el análisis de los resultados obtenidos acusa inconsistencias en mediciones bajo iguales condiciones de flujo, lo que complica la implementación de un sistema de control automático que no se valga de una base de datos construida con anterioridad.

Se concluye que, si bien el sistema de control y medición implementado no es capaz aún de realizar las tareas planteadas a completitud, el perfil alar flexible tiene la capacidad de mejorar sus parámetros aerodinámicos por medio del accionar del sistema. Además, el sistema aún cuenta con espacio para ser mejorado de diversas maneras.

ABSTRACT

In order to solve the design problems identified in the previous iteration of the project started by Barrios [1], a team is created to carry out two main tasks:

- The design and construction of a new airfoil prototype with application of FishBAC technology, carried out by Gajardo^[2].
- The design and implementation of a sensorized control system for said prototype, which is the topic that will be described in length in this document.

After addressing the theory and state of the art regarding control in wind turbines, this work follows the implementation of the robotization project starting from the identification of the problem and the formulation of a solution proposal. The methodology to be used for the development of the project is detailed, and steps to follow to achieve the stated objectives and solve the problem are proposed. There are five development stages:

- I. The conceptual design of the control system that is to be implemented, where the main tasks the system must fulfill are identified and functional modules are determined in order to accomplish those tasks.
- II. The selection of electronic components for the functional modules, where parts are chosen so that they meet both the system requirements and the identified limitations.
- III. The design of functional modules in detail, where the circuits to be implemented with the selected components are described.
- IV. The assembly and integration of the modules to the airfoil. This stage covers functional tests and data collection tests with the implemented system.
- V. The design and implementation of an autonomous control system. Stage that seeks to discern whether the system has the ability to be used as an autonomous system based on the data previously collected.

The project manages to be completed until stage IV. The control system is capable of modifying the shape of the built airfoil and collecting pressure data over the surface of the prototype. However, the analysis of the results shows inconsistencies in measurements made under the same flow conditions, which complicates the implementation of an autonomous control system that does not use a previously built database.

It is concluded that, although the implemented control and measurement system is not yet capable of carrying out the tasks that were set out, the flexible airfoil has the ability to improve its aerodynamic parameters by operating the system. Furthermore, the system still has room for improvement in various ways.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	2
Resumen	3
Abstract.....	4
1 Introducción	9
2 Problema.....	10
2.1 Desafíos.....	11
3 Marco Teórico	12
3.1 Perfiles Aerodinámicos.....	12
3.2 Fuerzas Aerodinámicas y Momentos	13
3.3 Números Adimensionales.....	14
3.3.1 Número de Reynolds.....	14
3.3.2 Coeficiente de Sustentación bidimensional	15
3.3.3 Coeficiente de Arrastre bidimensional	15
3.3.4 Coeficiente de Momento de inclinación bidimensional.....	15
3.3.5 Coeficiente de Presión.....	15
3.4 Flujo sobre un Perfil Aerodinámico	16
3.4.1 Sustentación	16
3.4.2 Momento de Inclinación	16
3.4.3 Arrastre	16
3.5 Comportamiento de un Perfil Aerodinámico	17
3.5.1 Perfiles Aerodinámicos Simétricos	19
3.5.2 Perfiles Aerodinámicos Combados.....	20
3.5.3 Régimen de Flujo Unido.....	21
3.5.4 Régimen de Alta Sustentación/Entrada en Pérdida de Sustentación	21
3.5.5 Régimen de Pérdida de Sustentación:.....	22
3.6 Sistemas de Control en Turbinas Eólicas.....	22
3.6.1 Componentes de un Sistema de Control.....	22
3.6.2 Control de los Procesos de una Turbina.....	25
3.7 Teoría e Implementación del Sistema de Control Dinámico	26
3.7.1 Propósito del Control Dinámico	26
3.7.2 Diseño del Sistema de Control Dinámico	26
3.7.3 Implementación del Sistema de Control Dinámico	30

3.8	Control Electrónico	31
3.8.1	Retroalimentación (<i>Feedback</i>).....	31
3.8.2	Control.....	32
3.8.3	Controlador PID	33
3.8.4	Método Ziegler-Nichols.....	35
4	Estado del Arte.....	37
4.1	Sistemas de Control en la Industria	37
4.1.1	Bergey Excel	37
4.1.2	Siemens SWT-2.3-82.....	38
4.1.3	Vestas V90.....	38
4.1.4	Ecotécnia 80	39
4.1.5	DeWind D8.2	39
4.2	Nuevos Sistemas de Control	39
4.2.1	Control de Inclinación de Aspa Avanzado	40
4.2.2	Control de Torsión del Aspa.....	41
4.2.3	Rotor de Diámetro Variable	42
4.3	Control Activo del Flujo	43
4.3.1	Alerones Convencionales	43
4.3.2	Alerones no Convencionales	44
4.3.3	Micro-alerones	46
4.3.4	Pared Flexible Activa	47
4.3.5	Perfil Alar Adaptativo	48
5	Propuesta de solución.....	50
5.1	Objetivo General.....	51
5.2	Objetivos Específicos.....	51
6	Metodología de Trabajo	52
6.1	Propuesta Metodológica.....	52
6.2	Diseño Básico del Control	52
6.2.1	El Controlador	53
6.2.2	Módulo Sensor.....	54
6.2.3	Módulo Actuador.....	55
6.3	Selección de Componentes.....	56
6.3.1	Selección del Controlador	56

6.3.2	Selección de Componentes del Módulo Actuador.....	56
6.3.3	Selección Componentes del Módulo Sensor	58
6.4	Diseño de Módulos Funcionales.....	61
6.4.1	Cicuito Módulo Actuador.....	61
6.4.2	Circuito Módulo Sensor.....	62
6.5	Ensamblaje de Circuitos e Integración a la Probeta	62
6.5.1	Ensamblaje de Módulos Funcionales.....	62
6.5.2	Integración a la Probeta.....	63
6.5.3	Recopilación de Datos en Funcionamiento	63
6.6	Implementación del Sistema de Control	64
6.6.1	Selección del Método de Diseño de Control Automático	64
6.6.2	Diseño Conceptual del Control Automático	65
7	Desarrollo y Experimentación.....	67
7.1	Ensamblaje y Prueba de Módulos Funcionales	67
7.1.1	Ensamblaje del Controlador.....	67
7.1.2	Ensamblaje y Habilitación del Módulo Actuador.....	70
7.1.3	Ensamblaje y Habilitación del Módulo Sensor.....	75
7.2	Integración de los Módulos Funcionales a la Probeta	78
7.2.1	Integración del Módulo Actuador	79
7.2.2	Integración del Módulo Sensor	81
7.3	Ensayos de Funcionamiento y Resultados Obtenidos	84
7.3.1	Equipo Utilizado en los Ensayos.....	84
7.3.2	Instalación del Prototipo en el Túnel de Viento	88
7.3.3	Ensayos Preliminares de Funcionamiento.....	89
7.3.4	Ensayo bajo Protocolo de Flexión.....	94
8	Análisis de Resultados	112
8.1	Análisis del Ensayo Preliminar de Recopilación de Datos.....	112
8.1.1	Diferencia entre Sensores	112
8.1.2	Sensibilidad de los Sensores	113
8.2	Análisis del Ensayo Preliminar de Variación de Presión.....	114
8.2.1	Comportamiento Escalonado ante Variación del Ángulo de Ataque.....	114
8.2.2	Efecto del Estado de Flexión	116
8.3	Análisis del Ensayo bajo Protocolo de Flexión	118

8.3.1	Efecto del Estado de Flexión sobre el Arrastre y la Sustentación	118
8.3.2	Eficiencia Aerodinámica en respuesta al Estado de Flexión	121
8.3.3	Coeficiente de Presión C_p sobre el Manto Superior del Perfil	122
8.3.4	Zona de Desprendimiento de Flujo	127
8.4	Análisis de la Recolección de Datos y Funcionamiento del Sistema	130
9	Conclusiones y Desafíos a Futuro	131
9.1	Cumplimiento de los Objetivos Generales.....	131
9.2	Observaciones Generales sobre el Desarrollo del Proyecto.....	132
9.3	Posibles Mejoras.....	133
9.3.1	Mejoras en el Diseño Material del Sistema.....	133
9.3.2	Mejoras en el Diseño del Sistema.....	133
9.4	Desafíos a Futuro	134
	Referencias.....	135
	Anexos.....	138
	Anexo 1: Código para lectura de <i>encoder</i> y controlador PID para motor.	138
	Anexo 2: Código para lectura del sensor provisto por el fabricante.....	140
	Anexo 3: Código para lectura de múltiples sensores usando el mux.....	141
	Anexo 4: Código de adquisición de datos de presión.	143
	Anexo 5: Código para la botonera de estados de flexión.....	144
	Anexo 6: Especificaciones técnicas del sensor de presión MPL3115A2	147

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, en Chile, alrededor del 22% de la matriz energética del país se encuentra suplida por energías renovables no convencionales (ERNC)^[3]. Esto se ha conseguido gradualmente gracias a los esfuerzos estatales en la promoción del uso de energías alternativas y la inversión privada y pública que se ha llevado a cabo durante los últimos años. Por otro lado, a pesar de que la energía eólica se encontraba posicionada en el primer lugar en cuanto a kW instalados a finales de 2015, su crecimiento se ha visto detenido frente a la gran reducción de costos en el que ha incurrido la energía solar fotovoltaica en el último tiempo.

La industria eólica es la segunda fuente de energía renovable no convencional con mayor capacidad instalada en nuestro país. Teniendo en cuenta el crecimiento de alrededor de un 53% en la producción de electricidad por estos medios en el último año y que los proyectos eólicos declarados en construcción corresponden al 40% del total de proyectos ERNC contabilizados en obras^[3], es sensato asumir que este crecimiento se mantendrá en los próximos años.

La energía eólica es un mercado energético maduro, cuya tecnología ha sido probada en distintos países a lo largo del mundo y que necesita de condiciones específicas de viento y terreno para optimizar su producción. Además, la producción eólica supone el uso de grandes extensiones de suelo, las cuales deben pasar por periodos de estudio de potencial que pueden extenderse sobre los dos años. Es debido a todo lo anterior, que la investigación en el campo de la aerogeneración se ha volcado a la búsqueda de métodos que den solución a las limitaciones que dificultan su implementación masiva, ya sea por medio de simulación de potencial eólico, métodos de monitoreo de potencial alternativos o la creación de nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia de los aerogeneradores ante condiciones adversas.

Los sistemas de control pasivos y activos han sido ampliamente utilizados en los aerogeneradores modernos, logrando alcanzar los límites en la mejora de eficiencia en la recolección de la energía eólica. En consecuencia, las nuevas tecnologías han apuntado al área del control de flujo, que se enfoca en eliminar las irregularidades causadas por eventos dinámicos que ocurren en un espacio y tiempo reducido.

El presente trabajo se realiza en el marco de un proyecto de desarrollo de tecnología para el control activo de flujo sobre el aspa, donde se busca generar un sistema electrónico capaz de controlar el funcionamiento de un perfil alar que implementa la tecnología biomimética FishBAC.

2 PROBLEMA

Si bien nuestro país se encuentra en un plan para conseguir que la matriz energética chilena esté constituida en su mayor parte por ERNC, es importante que la tecnología en los aerogeneradores sea mejorada a fin de conseguir que esta sea económicamente competitiva con las fuentes convencionales. Desde los comienzos de la industria eólica comercial, se ha incrementado el tamaño de las turbinas a modo de reducir el costo de la energía generada. Sin embargo, el aumento de tamaño y peso que han tenido los aerogeneradores en las últimas décadas ha imposibilitado el uso de control pasivo utilizado anteriormente, lo que a su vez ha promovido el desarrollo de nuevas técnicas de control de carga para las turbinas^[4].

Se hace necesario mejorar o sustituir el diseño de aerogeneradores de manera que estos puedan ser utilizados de manera más flexible y en terrenos de tamaño reducido, conservando o aumentando su eficiencia al transformar la energía cinética del viento en electricidad.

En el marco del diseño de un aerogenerador que se ajuste a los requerimientos antes descritos, la biomimética se presenta como una posibilidad de implementar nuevas tecnologías para la creación de un prototipo de álabe que sea capaz de desempeñarse efectiva y eficientemente en condiciones adversas de viento/terreno de manera que pueda ser utilizado para la generación de energía a menor escala que la que se trabaja actualmente en el mercado de producción eólica.

Basándose en el trabajo anteriormente realizado por *Barrios*^[1], se retoma el diseño de un perfil alar que aplica la tecnología FishBAC (*Fish Bone Active Chamber*) y surgen dos nuevos tópicos a solucionar: el desarrollo de un nuevo diseño mecánico y estudio de su materialidad, a cargo de *Gajardo*^[2]; y el diseño e implementación de un sistema de control automático, problema al que se intentará dar solución en el presente documento.

Cabe destacar que las mayores complicaciones a la hora de desarrollar ambos temas de trabajo se derivan de las limitaciones de tamaño a las que se ve sometido el prototipo, ya que el túnel de viento sólo permite una envergadura de alrededor de 35 [cm].

2.1 Desafíos

Los principales desafíos a los que se deberá dar solución para implementar el sistema de control de un álabe de curvatura variable y tamaño reducido son:

- Escoger el tipo de motor adecuado para realizar los movimientos requeridos. Esto incluye el tamaño, la potencia y la capacidad de realizar giros a posiciones específicas.
- Escoger sensores que permitan conseguir datos de calidad y que se ajusten al tamaño reducido de la probeta. Esto incluye la resolución, rango y método de comunicación.
- Diseñar los circuitos que permitan el uso de los elementos antes mencionados.
- Determinar el método de control electrónico a utilizar en el prototipo de álabe.
- Determinar acciones adicionales que deben ser realizadas para la implementación del control electrónico y su posterior ajuste.

3 MARCO TEÓRICO

La presente sección presenta las bases teóricas que sustentan el proyecto. La información referente a la aerodinámica y al control en turbinas eólicas fue extraída de *Manwell et al. (2009)*^[5], mientras que la teoría del control electrónico fue extraído de *Åström y Murray (2009)*^[6].

3.1 Perfiles Aerodinámicos

Los perfiles aerodinámicos o perfiles alares son estructuras con formas geométricas específicas que buscan generar fuerzas mecánicas en respuesta al movimiento relativo de dicho perfil en un fluido circundante. Estos se encuentran caracterizados por bastantes términos, los cuales serán explicados a continuación y pueden ser observados en la Fig. 1.

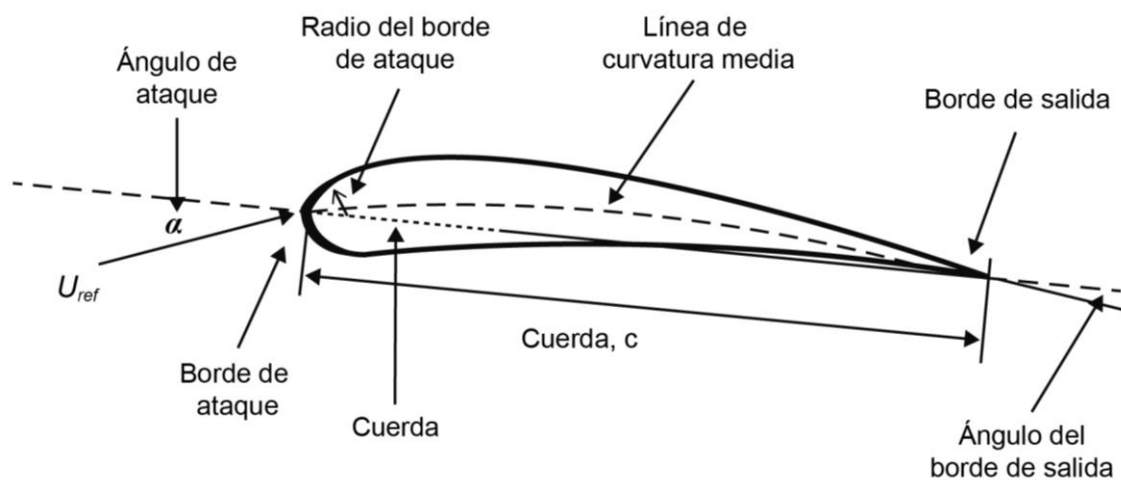


Figura 1: Nomenclatura de un perfil aerodinámico. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

- **Ángulo de ataque α (angle of attack)**: ángulo que se forma entre la línea de la cuerda y el viento relativo U_{rel} .
- **Ángulo del borde de salida**: ángulo que se forma entre la línea de la cuerda y la prolongación del borde de salida.
- **Borde de ataque (leading edge)**: punto en que el perfil entra en contacto con el flujo.
- **Borde de salida (trailing edge)**: punto donde el flujo sale del perfil.
- **Comba (camber)**: distancia entre la línea de curvatura media y la línea de la cuerda, |medida perpendicular a esta última.
- **Cuerda (chord)**: distancia desde el borde de ataque al borde de salida medida a lo largo de la línea de la cuerda.
- **Envergadura**: longitud perpendicular al plano del perfil, largo entre los extremos del ala.
- **Espesor**: distancia entre la superficie superior y la inferior, medida perpendicular a la línea de la cuerda.
- **Línea de curvatura media (mean camber line)**: línea formada por los puntos medios entre la superficie superior e inferior.

- **Línea de la cuerda (*chord line*):** línea recta que conecta el borde de ataque con el borde de salida.
- **Radio de curvatura (*leading edge radius*):** radio de un círculo tangente a la superficie superior e inferior cuyo centro se encuentra ubicado en la línea de curvatura media.
- **Velocidad relativa U_{rel} :** velocidad del flujo respecto a la línea de la cuerda.

Por último, los parámetros geométricos que afectan en el desempeño aerodinámico de un perfil alar incluyen: el radio de curvatura del borde de ataque, la línea de curvatura media, el espesor máximo, la distribución de espesor del perfil y el ángulo de salida del flujo.

3.2 Fuerzas Aerodinámicas y Momentos

El flujo de aire sobre un perfil alar produce una distribución de fuerzas sobre su superficie. Estas fuerzas están asociadas a la capa de límite del fluido que se mueve a baja velocidad en las cercanías de la superficie del cuerpo. La velocidad del fluido por sobre la superficie convexa aumenta su velocidad, produciendo una presión media menor que la que se observará en el área inferior. Por su parte, la fricción viscosa entre aire y el perfil desacelera el flujo que se encuentra en contacto a la superficie. Las fuerzas aerodinámicas y momentos que actúan sobre un cuerpo que se opone a un flujo de aire, sin importar la complejidad del cuerpo en cuestión, se deben solamente a dos fuentes:

1. La distribución de presión sobre la superficie del cuerpo.
2. La distribución de esfuerzo cortante sobre la superficie del cuerpo.

Tanto la presión p como el esfuerzo cortante τ poseen dimensiones de fuerza por unidad de área. Sin embargo, actúan en direcciones distintas: la presión actúa normal a la superficie, mientras que el esfuerzo cortante lo hace tangencialmente, como se observa en la Fig. 2.

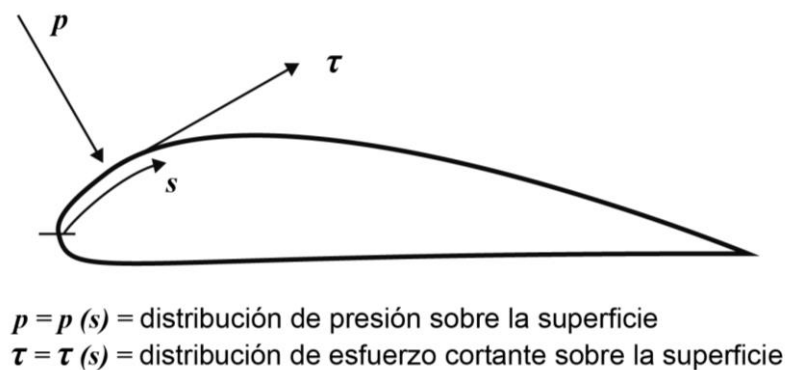


Figura 2: Presión y esfuerzo cortante en una superficie aerodinámica. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

Como se puede observar en la Fig. 3, la resultante de todas estas fuerzas de presión y fricción es representada por dos fuerzas y un momento que actúan en un punto ubicado sobre la línea de cuerda a una distancia de $c/4$ desde el borde de ataque.

- **Fuerza de Arrastre (*drag*):** paralela a la dirección del flujo de aire, la fuerza de arrastre se debe tanto a las fuerzas de fricción viscosa en la superficie como a la diferencia de presiones entre las superficies frontal y posterior del perfil.
- **Fuerza de Sustentación (*lift*):** perpendicular a la dirección del flujo de aire, la fuerza de sustentación es una consecuencia de la diferencia de presión entre las superficies superior e inferior del perfil.
- **Momento de inclinación (*pitching*):** definido sobre un eje perpendicular a la sección del perfil aerodinámico.

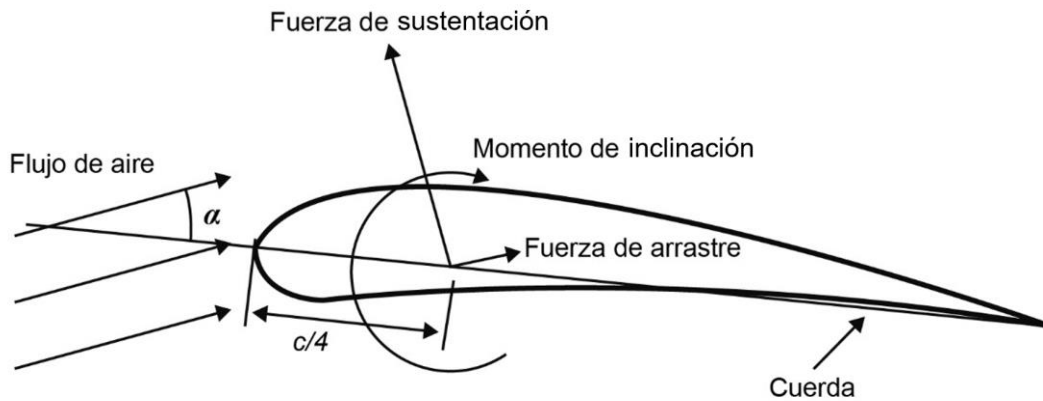


Figura 3: Fuerzas y momentos en un perfil alar. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

3.3 Números Adimensionales

Tanto la teoría como la investigación han demostrado que muchos problemas asociados al flujo pueden ser caracterizados por parámetros adimensionales. Estos, como su nombre lo indica, no están definidos por una unidad física, pero corresponden a un producto o cociente de cantidades que sí las poseen.

3.3.1 Número de Reynolds

Uno de los números adimensionales de mayor importancia a la hora de definir las características del flujo de un fluido es el número de Reynolds, el cual se encuentra definido por:

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas inercial}}{\text{Fuerzas Viscosas}} \quad (1)$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido en $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$.
- μ es la viscosidad dinámica del fluido en $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$.
- U es la velocidad que caracteriza la escala del flujo en $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$.
- L es la longitud que caracteriza la escala del flujo en $[\text{m}]$.

En nuestro caso particular, U corresponde a la velocidad del flujo libre y L a la longitud de la cuerda.

Tanto para casos 2D y 3D es posible definir parámetros adimensionales en función del número de Reynolds a modo de evaluar coeficientes de fuerza y momento. Los perfiles aerodinámicos tridimensionales, debido a que su envergadura es finita, presentan coeficientes de fuerza y momento que son afectados por el flujo que se origina en los bordes de estos. Por otro lado, en los perfiles bidimensionales se asume una envergadura infinita, por lo que estos efectos no se observan. Teniendo en cuenta esto, es posible definir coeficientes para las fuerzas y momentos principales que afectan un perfil aerodinámico.

3.3.2 Coeficiente de Sustentación bidimensional

$$C_l = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Fuerza de sustentación/unidad de longitud}}{\text{Fuerza dinámica/unidad de longitud}} \quad (2)$$

3.3.3 Coeficiente de Arrastre bidimensional

$$C_d = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} = \frac{\text{Fuerza de arrastre/unidad de longitud}}{\text{Fuerza dinámica/unidad de longitud}} \quad (3)$$

3.3.4 Coeficiente de Momento de inclinación bidimensional

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 A c} = \frac{\text{Momento de inclinación}}{\text{Momento dinámico}} \quad (4)$$

3.3.5 Coeficiente de Presión

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} = \frac{\text{Presión Estática}}{\text{Presión Dinámica}} \quad (4)$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido en $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$.
- U es la velocidad del flujo libre en $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$.
- A es el área proyectada del perfil en $[\text{m}^2]$.
- c es la longitud de la cuerda en $[\text{m}]$.
- l es la longitud de la envergadura en $[\text{m}]$.
- p es la presión estática del fluido en el punto evaluado en $[\text{Pa}]$.
- p_∞ es la presión del flujo libre en $[\text{Pa}]$.

3.4 Flujo sobre un Perfil Aerodinámico

La sustentación, el arrastre y el momento de inclinación de un perfil aerodinámicos son generados por la variación(distribución) de presión a lo largo de la superficie y la fricción entre el flujo de aire y el perfil.

El principio de Bernoulli nos permite entender que la variación de presión a lo largo de la superficie del perfil aerodinámico se debe a los cambios de velocidad del flujo a pasar sobre éste. Asumiendo flujo sin fricción se tiene:

$$p + \frac{1}{2}\rho U^2 = \text{constante} \quad (5)$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido en $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$.
- p es la presión estática en $[\text{Pa}]$.
- U es la velocidad del flujo libre en $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$.

3.4.1 Sustentación

Al enfrentarse el flujo de aire contra la forma redondeada del borde de ataque, éste comienza a ganar velocidad, generando una baja de presión que resulta en un gradiente de presión negativo. Por otro lado, a medida que el flujo se aproxima al borde de salida, la disminución en la velocidad del flujo produce un aumento en la presión superficial y, por lo tanto, un gradiente de presión positivo. Finalmente, dependiendo del diseño del perfil y el ángulo de ataque, si el aire aumenta su velocidad sobre la superficie superior en mayor medida que el flujo sobre la superficie inferior, el perfil aerodinámico experimentará una fuerza neta de sustentación.

3.4.2 Momento de Inclinación

De forma similar a la fuerza de sustentación, el momento de inclinación se obtiene al integrar el momento de las fuerzas de presión respecto al punto de un cuarto de la cuerda sobre la superficie del perfil.

3.4.3 Arrastre

Las fuerzas de arrastre son consecuencia tanto de la distribución de presión sobre el perfil como de la fricción entre el flujo de aire y la superficie. La componente en dirección del flujo de la distribución de presión resulta en arrastre debido a presión. Por su parte, el arrastre debido a fricción es una función de la viscosidad del fluido y disipa energía al campo de flujo.

El arrastre viscoso también genera la formación de dos regiones en el flujo: la parte más alejada de la superficie, donde los efectos de la fricción son despreciables, y la capa límite, que se encuentra en contacto con el perfil y donde los efectos de la fricción son dominantes.

Normalmente, el flujo sobre el perfil comienza siendo laminar en el borde de ataque y, a medida que avanza sobre la superficie, la interacción entre la viscosidad y las fuerzas no inerciales causan la transición a turbulento. Cabe destacar que una capa límite con

comportamiento laminar presentará fuerzas de fricción mucho menores que una capa límite turbulenta.

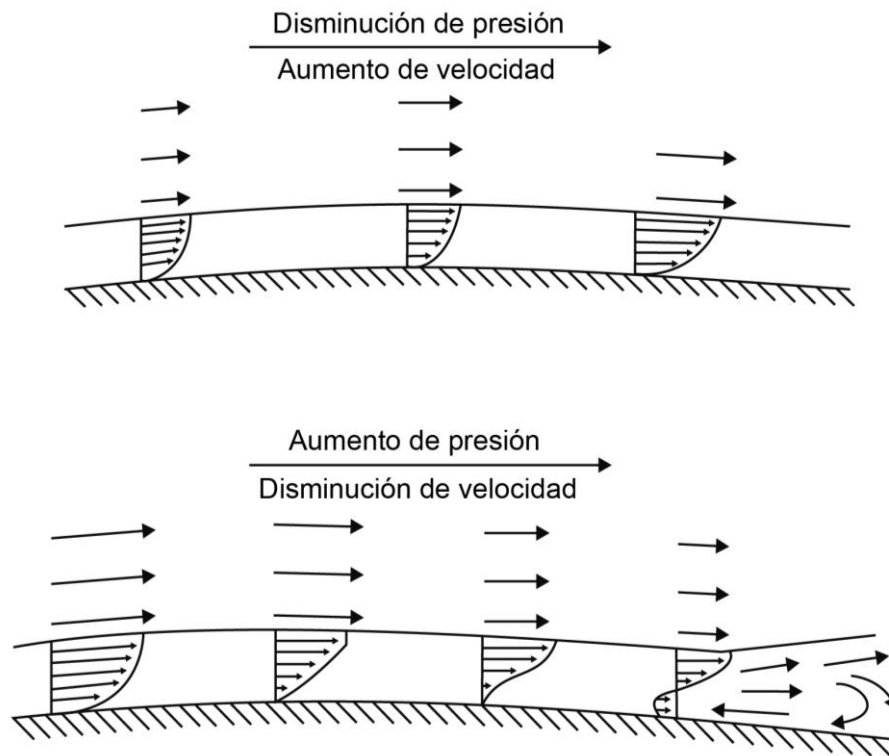


Figura 4: Efectos de un gradiente de presión favorable (disminuyendo) y desfavorable (aumentando) en la capa límite. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

El gradiente de presión tiene un efecto significativo en la capa límite, como se puede observar en la Fig. 4. Si la presión disminuye a medida que el flujo avanza sobre la superficie del perfil aerodinámico, se considera que existe un gradiente de presión favorable. Por otro lado, si la presión aumenta a medida que el flujo avanza, el gradiente es desfavorable. En presencia de un gradiente de presión desfavorable y, con ayuda de la fricción, el flujo de aire se puede ver detenido o incluso revertirse, resultando en que el flujo se separe del perfil y esto produzca una condición conocida como **entrada en pérdida de sustentación** o **stall**.

3.5 Comportamiento de un Perfil Aerodinámico

El flujo alrededor de un perfil aerodinámico puede ser entendido de mejor manera si se considera el flujo alrededor de un cilindro como punto de referencia. Si se trazan líneas de flujo, las cuales representan el camino que toma una partícula fluida en el flujo, es posible visualizar los efectos que tiene un objeto al interactuar con el fluido, como se observa en la Fig. 5. Las líneas de flujo que convergen indican un aumento en la velocidad y una respectiva baja en la presión, mientras que las líneas que divergen muestran el efecto contrario, es decir, una baja en la velocidad y un aumento en la presión. La Fig. 5 (a) ilustra el flujo alrededor de un cilindro estático, donde se asume que el flujo no está afectado por arrastre ni inercia. Las líneas de flujo dibujadas se acercan a medida que pasan por el cilindro, indicando el respectivo aumento de velocidad y baja de presión. Debido a la simetría del patrón observado sabemos que no existe sustentación en el cilindro.

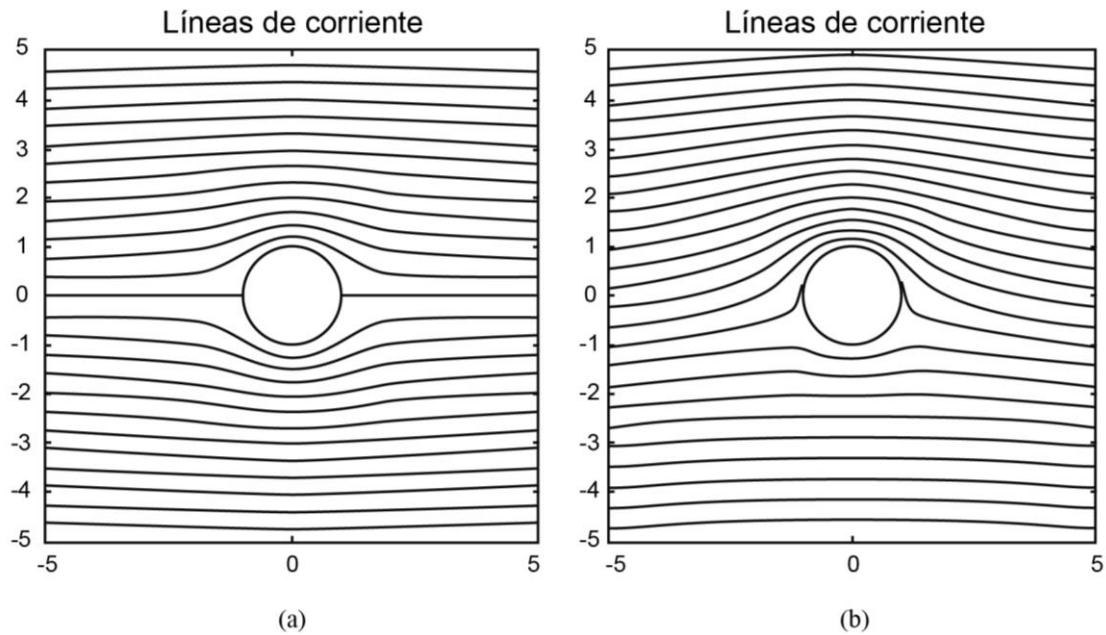


Figura 5: (a) flujo alrededor de un cilindro estático; (b) flujo alrededor de un cilindro rotando. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

Por otro lado, cuando se trata de un flujo rotacional, la situación cambia. La rotación en el fluido puede ser provocada tanto por un objeto rotatorio en el flujo o como resultado de la forma de un objeto, como ocurre en el caso de los perfiles aerodinámicos que producen el movimiento rotacional debido a su forma.

El flujo rotacional es descrito en términos de la vorticidad y la circulación. Para un elemento fluido que se encuentra rotando, su velocidad angular está caracterizada por su vorticidad, ζ , la cual equivale al doble de la velocidad angular del elemento y está descrita por:

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

Donde:

- u es la componente en dirección x del flujo en $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$.
- v es la componente en dirección y del flujo en $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$.

La circulación, Γ , es la integral de la vorticidad de cada elemento fluido con respecto a sus respectivas áreas infinitesimales sobre la región de interés:

$$\Gamma = \iint \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx dy \quad (7)$$

Por último, es posible demostrar que la sustentación por unidad de longitud está relacionada a la circulación según:

$$\frac{L}{l} = \rho U_{\infty} \Gamma \quad (8)$$

Si se considera el caso ilustrado en la Fig. 5 (b), se puede observar que las líneas de flujo se encuentran más cerca en la parte superior del cilindro que en la inferior. Esto indica que existe una menor presión por arriba del cilindro y, por lo tanto, si existe sustentación. Teniendo en cuenta que para un cilindro de radio r , el máximo valor de la circulación es $\Gamma = 4\pi U_{\infty} r$, se obtiene que el coeficiente de sustentación máximo corresponde a $C_l = 4\pi$.

3.5.1 Perfiles Aerodinámicos Simétricos

Utilizando el método explicado anteriormente, es posible predecir la distribución de presión sobre un perfil aerodinámico o evaluar el máximo coeficiente de sustentación que se podría observar al enfrentarlo a un flujo. Para ello es necesario transformar el sistema de coordenadas a modo de que la sección del antes cilindro se asemeje a la forma del perfil de interés, como se muestra en la Fig. 6.

$$\zeta = z + r^2/z$$

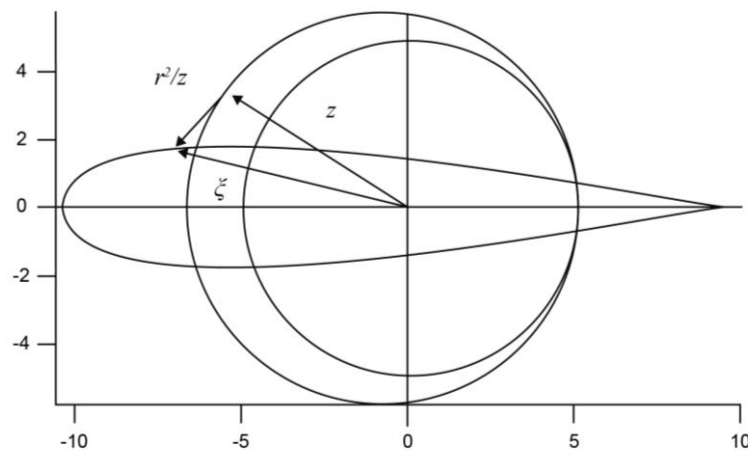


Figura 6: Perfil aerodinámico simétrico derivado de un cilindro transformado. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

Este método de análisis provee la base para la teoría de perfiles alares, la cual es utilizada para predecir las características de los perfiles de uso más común. Por ejemplo, la teoría muestra que el coeficiente de sustentación de un perfil aerodinámico simétrico, a bajos ángulos de ataque, es equivalente a $2\pi\alpha$ (donde α es el ángulo de ataque en radianes).

Bajo condiciones ideales, todos los perfiles aerodinámicos de grosor finito deberían presentar coeficientes de sustentación teóricos similares. Esto significa que el coeficiente de sustentación aumentará a medida que el ángulo de ataque aumenta, pero sólo a bajos

ángulos de ataque. En la Fig. 8 se pueden observar los coeficientes de sustentación y arrastre típicos para un perfil NACA 0012 (Fig. 7) en función del ángulo de ataque y número de Reynolds. Se incluye también el coeficiente de sustentación de una placa plana en condiciones ideales a modo de comparación.

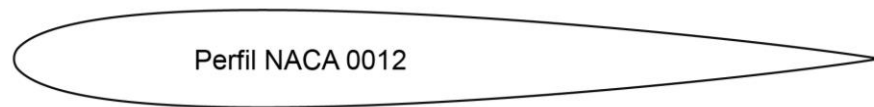


Figura 7: Perfil aerodinámico NACA 0012. (Fuente: elaboración propia).

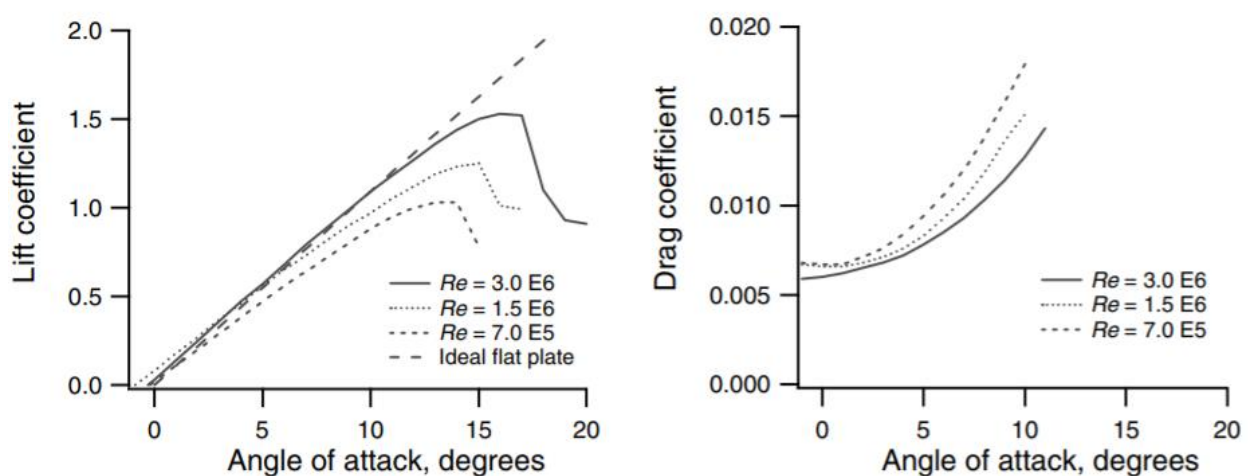


Figura 8: Coeficientes de sustentación y arrastre para el perfil aerodinámico simétrico NACA 0012. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

Es importante notar que, a pesar de que la correlación se muestra certera para bajos ángulos de ataque, al aumentar el ángulo, el rendimiento teórico y el real difieren en mayor medida cada vez. Estas diferencias se deben principalmente a que la estimación teórica considera que el aire no posee viscosidad, propiedad del fluido que es la principal causante de la separación del flujo al aumentar el ángulo de ataque y la consecuente caída en la sustentación. Además, a medida que el número de Reynolds disminuye, se observa un aumento en la magnitud de las fuerzas viscosas en comparación con las fuerzas inerciales. Esto aumenta los efectos de la fricción superficial, la que a su vez afecta la velocidad, el gradiente de presión y la sustentación que el perfil genera.

3.5.2 Perfiles Aerodinámicos Combados

El uso de perfiles aerodinámicos combados o asimétricos permite aumentar la sustentación y disminuir el arrastre para bajos ángulos de ataque. Si analizamos, por ejemplo, el perfil DU-93-W-210 (Fig. 9), cuyos coeficientes de sustentación y arrastre respecto al ángulo de ataque se encuentra graficado en la Fig. 10 para un número de Reynolds de 3.000.000, es posible observar que el comportamiento que éste perfil tiene es muy similar al comportamiento que presentan los perfiles aerodinámicos simétricos. Al igual que en el caso

de NACA 0012, el coeficiente de sustentación aumenta a medida que el ángulo de ataque se hace mayor hasta que alcanza el punto en que entra en pérdida de sustentación. Cabe destacar que, a diferencia del perfil NACA 0012, el perfil DU-93-W-210 tiene un coeficiente de sustentación no nulo para un ángulo de ataque igual a cero. De igual manera, el coeficiente de arrastre comienza siendo pequeño y comienza a aumentar en mayor medida luego de alcanzar el ángulo de ataque crítico.

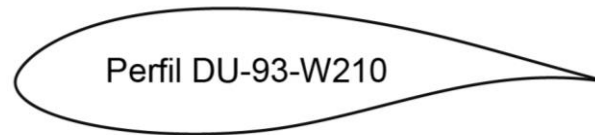


Figura 9: Perfil aerodinámico DU-93-W-210. (Fuente: elaboración propia).

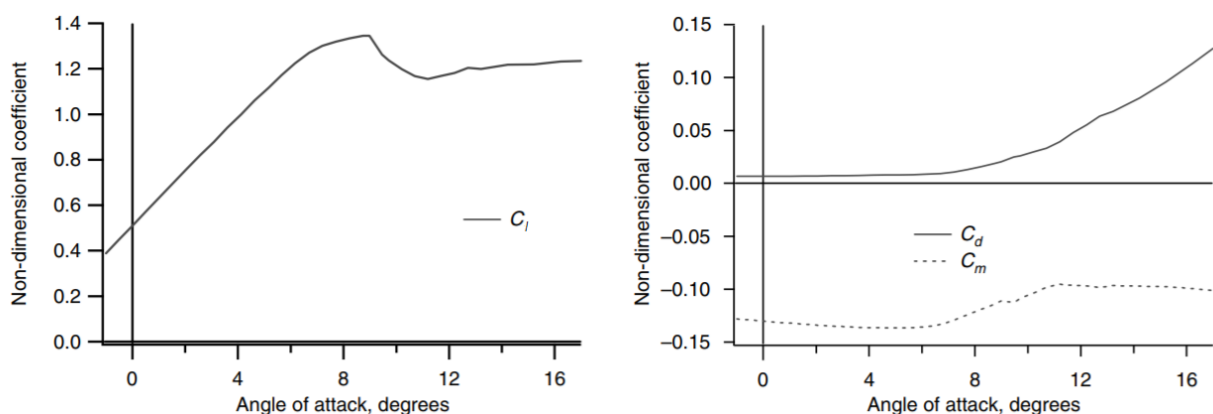


Figura 10: Coeficientes de sustentación, arrastre y de momento de inclinación. C_l , C_d y C_m respectivamente. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente explicado, es posible categorizar el comportamiento de un perfil aerodinámico en tres regímenes: régimen de flujo unido (**attached flow regime**), régimen de alta sustentación/entrada en pérdida de sustentación (**high lift/stall development regime**), y régimen de pérdida de sustentación (**flat plate/fully stalled regime**).

3.5.3 Régimen de Flujo Unido

Para bajos ángulos de ataque (hasta aproximadamente $\alpha = 7^\circ$ para el perfil DU-93-W-210), el flujo se mantiene unido a la superficie superior del perfil aerodinámico. En este régimen de flujo, la sustentación aumenta con el ángulo de ataque y el arrastre es relativamente bajo.

3.5.4 Régimen de Alta Sustentación/Entrada en Pérdida de Sustentación

En el régimen de alta sustentación ($\alpha = 7^\circ - 11^\circ$ aproximadamente para el perfil DU-93-W-210), el coeficiente de sustentación llega a su punto más alto mientras que cada vez se hace más presente el efecto de la pérdida de sustentación. Cuando el ángulo de ataque sobrepasa un valor crítico que depende del número de Reynolds, el flujo se separa de la

superficie superior del perfil aerodinámico y forma una estela sobre el perfil, como se observa en la Fig. 11, reduciendo la sustentación y aumentando el arrastre.

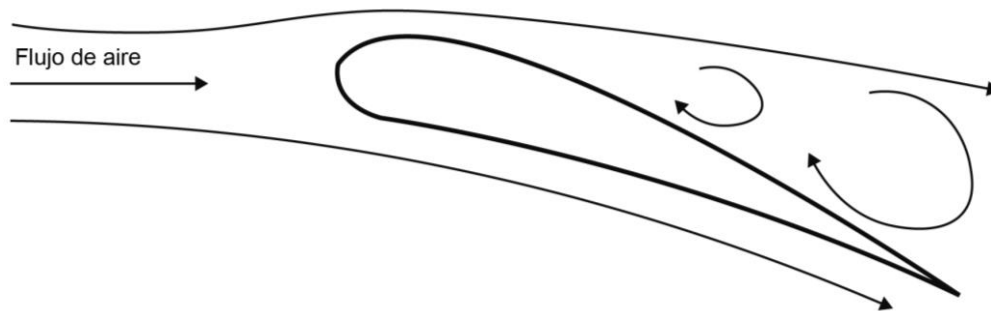


Figura 11: Ilustración de la pérdida de sustentación o stall. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

3.5.5 Régimen de Pérdida de Sustentación:

En el régimen pérdida de sustentación (para ángulos de ataque mayores y hasta los 90°), el perfil actúa similar a una placa plana, con coeficientes de sustentación y arrastre aproximadamente iguales para un ángulo de ataque de 45° y sin sustentación para los 90° .

3.6 Sistemas de Control en Turbinas Eólicas

A fin de transformar la energía del viento, es necesario que todos los subsistemas que componen una turbina eólica sean operados de manera que el funcionamiento de ésta sea el óptimo. Es por esta razón que se hace necesario implementar sistemas de control que puedan operar estos subsistemas y así asegurar el buen funcionamiento del equipo.

En particular, se pueden distinguir dos niveles principales de control de operación en una turbina: control supervisor y control dinámico. El primero se encarga principalmente de monitorear y gestionar la operación del equipo, ordenando las acciones de control generales (paradas, desconexión de la red, etc.). El control dinámico, por su parte, se encarga de manejar los aspectos de la operación de la turbina que se ven afectados por la dinámica de la máquina en sí y por tanto afectan el resultado de las acciones de control (cambio en la orientación de los álabes en respuesta a vientos turbulentos, por ejemplo).

Las funciones que se asocian al sistema de control supervisor están caracterizadas por reacciones a cambios en las condiciones ambientales y de operación en el mediano y largo plazo. Generalmente el controlador supervisor realiza cambios entre los estados de operación del equipo y provee información al sistema de control dinámico.

Por su parte, el control dinámico realiza ajustes instantáneos continuamente en los componentes de la turbina, los cuales se realizan en reacción a cambios instantáneos en las condiciones de operación. Normalmente existen múltiples controladores dinámicos, cada uno encargado de un subsistema en particular del equipo. A su vez, estos múltiples controladores dinámicos son gestionados por el sistema de control supervisor.

3.6.1 Componentes de un Sistema de Control

El control de procesos mecánicos y/o eléctricos requiere de cinco componentes funcionales principales (Ilustrados en la Fig. 12):

1. Un proceso que posea puntos variables que afecten o cambien el mismo proceso.
2. Sensores o indicadores que comuniquen el estado del proceso al sistema de control.
3. Un controlador, ya sea físico (*hardware*) o digital (*software*), que determine las acciones que se realizarán. El controlador puede consistir de computadores, circuitos eléctricos o sistemas mecánicos.
4. Un amplificador, el cual se encarga de proveer potencia a la acción de control. Normalmente el amplificador es controlado por una entrada de baja potencia que controla la salida desde una fuente de alta potencia externa.
5. Actuadores que intervengan el proceso a modo de cambiar el sistema de operación.

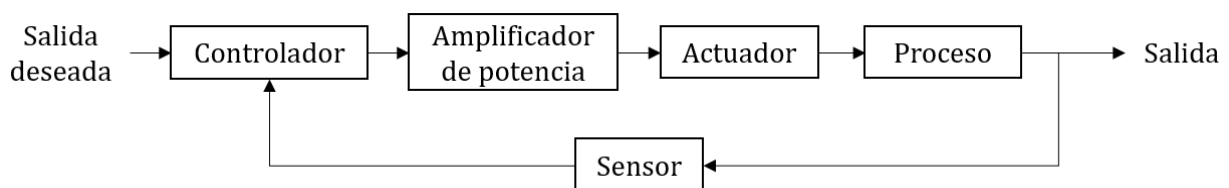


Figura 12: Componentes de un sistema de control. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

3.6.1.1 Procesos controlables en una turbina eólica

Alguno de los procesos más relevantes que pueden ser controlados en una turbina eólica incluyen:

- Desarrollo de torque aerodinámico.
- Desarrollo de torque en el generador.
- Conversión de corriente eléctrica y flujo fluido en movimiento. Los mecanismos de ajuste de posición usualmente utilizan control eléctrico o hidráulico para orientar la dirección y velocidad del movimiento mecánico.
- Conversión de energía cinética del viento en electricidad. Esto requiere de monitoreo y secuenciación de varios subprocesos.

3.6.1.2 Sensores en una turbina eólica

En una turbina eólica moderna, múltiples sensores son utilizados para comunicar aspectos importantes de la operación al sistema de control. Algunas de las variables medidas son:

- **Velocidad.** Incluye la velocidad del rotor, generador, del viento, tasa de cambio del movimiento horizontal (*yaw rate*), dirección de giro, etc.
- **Temperatura.** Incluye la temperatura de la lubricación de la caja de cambios, del aceite hidráulico, de soportes rotatorios, del aire, de los componentes electrónicos.
- **Posición.** Incluye la inclinación de las aspas, posición del alerón, dirección del viento, orientación del equipo, etc.
- **Características Eléctricas.** Incluye la potencia de la red eléctrica, corriente, factor de potencia, voltaje, frecuencia de la red, operación del convertidor, entre otros.
- **Parámetros de fluidos.** Incluye la presión neumática e hidráulica, niveles de aceite, flujo del aceite hidráulico, etc.

- **Movimiento, esfuerzos y tensiones.** Incluye esfuerzos en la torre, torque en el eje, vibraciones de la caja de cambios, momento flexor en la base del aspa, entre otros.
- **Condiciones ambientales.** Humedad, congelamiento de sensores, electricidad ambiental.

Los sensores pueden incluso estar formados por elementos físicos del equipo, los cuales indican estados dependiendo de la acción que realizan y cómo la realizan.

3.6.1.3 Controladores de una turbina eólica

Los controladores proveen conexión entre las mediciones de los aspectos de operación y las acciones que afectan la operación de la turbina. Los tipos de controlador más típicos son:

- **Mecanismos mecánicos.** Incluyen rotores de cola, uniones, resortes, gobernadores centrífugos, etc. Pueden ser utilizados para ajustar la inclinación de las aspas, la posición en el arco horizontal (*yaw*) y la velocidad del rotor.
- **Circuitos eléctricos.** Estos pueden proveer conexión directa entre la salida de un sensor y la acción de control requerida. La señal eléctrica de un sensor puede ser utilizada para energizar *relays* o interruptores. Circuitos eléctricos pueden ser diseñados para incluir respuestas dinámicas a las señales de entrada a modo de obtener un sistema dinámico.
- **Computadores.** Los computadores pueden ser configurados utilizar señales digitales y análogas, y también pueden ser programados para realizar operaciones lógicas complicadas a modo de entregar respuestas dinámicas a las señales de entrada. Su mayor ventaja es que el código de control puede ser editado y, de este modo, es posible cambiar el control de operación.

3.6.1.4 Amplificadores en turbinas eólicas

Cuando la señal de un controlador no tiene suficiente potencia para energizar un actuador es necesario utilizar un amplificador entre el controlador y el actuador. Los amplificadores más comunes incluyen.

- **Interruptores.** Existen varios interruptores que pueden ser activados con señales de baja potencia o por una pequeña fuerza, para luego actuar como amplificador al activar fuentes de potencia mayores. Esto incluye relés, transistores, rectificadores (*silicon-controlled rectifiers*) y válvulas hidráulicas.
- **Amplificadores eléctricos.** Amplifican directamente el voltaje de control o la corriente hasta un nivel en que el actuador pueda ser utilizados.
- **Bombas hidráulicas.** Proveen fluido a alta presión que puede ser controlado por medio de válvulas que requieren poca potencia para funcionar.

Es importante notar que los amplificadores no siempre son necesarios en el sistema de control de una turbina eólica.

3.6.1.5 Actuadores en una turbina eólica

Algunos de los actuadores que pueden estar presentes en una turbina son:

- **Dispositivos electromecánicos.** Esto incluye motores de corriente continua, motores paso a paso, motores de corriente alterna con controladores de estado sólido, actuadores lineales, magnetos, etc.
- **Pistones hidráulicos.** Usualmente usados en los sistemas de posicionamiento que requieren de alta potencia y velocidad.
- **Calentadores de resistencia y ventiladores.** Utilizados para controlar la temperatura.

Los actuadores pueden incluir ruedas dentadas, uniones y otros elementos de máquinas que modifiquen la fuerza y dirección del actuador.

3.6.2 Control de los Procesos de una Turbina

Los procesos que se presentan en la operación de una turbina eólica, en particular los que se refieren a la generación de torque aerodinámico y aprovechamiento del recurso viento, son directamente afectados por la acción del controlador que dirige su funcionamiento. A continuación, se detallan enfoques típicos para el control del torque aerodinámico.

3.6.2.1 Control del torque aerodinámico

El torque aerodinámico es generado en una turbina debido a la contribución de múltiples factores: la tasa de velocidad de la punta del rotor (*tip speed ratio*), el coeficiente de potencia C_p (determinado a partir del diseño del aspa, la velocidad del viento y la velocidad del rotor), la geometría del rotor, velocidad del viento, y error en la posición del ángulo del rotor con respecto al viento (*yaw error*), entre otros. Todos estos parámetros, exceptuando la velocidad del viento, pueden ser utilizados para controlar el torque aerodinámico generado.

El *Tip Speed Ratio (TSR)* puede ser utilizado para cambiar la eficiencia del rotor. En el caso de las turbinas de velocidad constante reguladas mediante *stall*, bajos *TSR* y C_p son utilizados para regular el torque en presencia de vientos fuertes. Por su parte, las turbinas de velocidad variable pueden modificar la velocidad del rotor a modo de cambiar mantener un *TSR* favorable o cambiarlo a fin de reducir el coeficiente de potencia.

Otra forma de afectar la generación de torque aerodinámico es cambiar la geometría del rotor de manera que las fuerzas de sustentación y arrastre sean afectadas. Esto puede conseguirse modificando la inclinación (ángulo de ataque) del aspa en su totalidad o parcialmente. Regular la inclinación del aspa a lo largo de toda su envergadura permite dos cursos de acción: reducir el ángulo de ataque a modo de producir una baja controlada en la sustentación, o aumentar el ángulo de ataque para producir *stall*, reduciendo las cargas. Si bien la reducción del ángulo permite una operación más tranquila y exacta, en la práctica las variaciones del viento ocurren mucho más rápido que lo que el sistema puede responder, lo que resulta en grandes variaciones de carga. Por su parte, inducir *stall* incrementa el empuje sobre la turbina y el ruido generado, pero al ser el torque y empuje menos sensibles a los cambios en la inclinación del aspa y en la velocidad del viento, las cargas por fatiga son reducidas en contraste a las generadas al disminuir el ángulo de ataque.

El uso de alerones para modificar la geometría en parte del aspa permite la reducción del coeficiente de sustentación y el aumento del coeficiente de arrastre a lo largo ésta. Además, a diferencia de los reguladores de inclinación de aspa completa, los alerones no requieren de actuadores poderosos, pero sí es necesaria la instalación de mecanismos en el aspa misma, lo que afecta significativamente el diseño de ésta.

Finalmente, enfoques más recientes incluyen la investigación de métodos para ajustar la dinámica de los fluidos a lo largo del aspa en respuesta a variaciones locales del flujo. Algunos de estos métodos incluyen chorros de aire que benefician el acoplamiento del flujo a la superficie del aspa, bordes de salida flexibles, lengüetas que modifican el flujo sobre la superficie, cambios efectivos en la comba del perfil, entre otros. A estos métodos se les refiere en ocasiones como "*smart*" *blade technologies*, ya que corresponden a un conjunto de actuadores y sensores distribuidos a lo largo del aspa que, en conjunto con microprocesadores, controlan de manera activa el flujo local.

3.7 Teoría e Implementación del Sistema de Control Dinámico

El sistema de control dinámico gana relevancia sobre el sistema de control supervisor debido a la naturaleza del problema que se desea abordar. Es por esto que a continuación se detallan los aspectos claves que involucra la implementación de un sistema de control dinámico para la regulación del funcionamiento de una turbina eólica.

3.7.1 Propósito del Control Dinámico

Un sistema de control dinámico es utilizado para regular los aspectos de la operación de una máquina en los cuales la dinámica de ésta tiene efecto en el resultado de la acción de control. Estos sistemas de control pueden ser diseñados para mejorar la exactitud y la dinámica de la respuesta de una máquina, para mejorar la respuesta de la misma a perturbaciones externas que afectan el sistema, o para la operación de ésta bajo condiciones no regulares. Para conseguir dicho resultado, los sistemas de control utilizan retroalimentación, es decir, miden el resultado de una acción de control y utilizan la información como una entrada para la siguiente acción.

3.7.2 Diseño del Sistema de Control Dinámico

3.7.2.1 Metodología clásica de diseño de un sistema de control

El proceso de diseño para un sistema de control, como ha sido descrito en la literatura, está compuesto de los siguientes pasos:

- **Análisis del problema.** Al analizar el problema es importante considerar la operación deseada de la máquina, los métodos de control existentes, sensores y actuadores apropiados, y otras restricciones de diseño. El análisis debe indicar si existe necesidad de rediseñar la maquina con mejores características de control.
- **Formulación de especificaciones.** Las especificaciones de diseño preliminares incluyen mediciones como el tiempo de respuesta del sistema, excesos en la respuesta del sistema ante una entrada y la estabilidad del sistema. En algunos casos será necesario hacer cambios físicos la máquina debido a que una respuesta más rápida del sistema conlleva

la necesidad de mayor potencia de los actuadores, mayores cargas en los componentes y una disminución en la resistencia a la fatiga de los elementos.

- **Desarrollo de un modelo.** Es necesario comprender la dinámica del sistema a la hora de diseñar un sistema de control, lo que comúnmente se logra mediante modelos matemáticos. Según el sistema en estudio, los modelos pueden ser lineales o no-lineales.
- **Linealización del modelo.** Usualmente, para el diseño preliminar de un sistema de control, estos modelos son linealizados. Esto permite el uso de múltiples enfoques sencillos para el diseño de sistemas lineales.
- **Diseño del control.** En el enfoque “clásico” de diseño de control, se busca que la dinámica del controlador permita lograr que la dinámica de la máquina se ajuste a las especificaciones de diseño. Para ello, el diseño del sistema de control es ajustado bajo tres niveles de frecuencia. El comportamiento de baja frecuencia se encarga de seguir la pista de los comandos de control deseados. En el rango de frecuencia media, la respuesta del sistema busca asegurar la estabilidad y un tiempo de respuesta adecuado. Las dinámicas de alta frecuencia buscan asegurar que las dinámicas no modeladas y el ruido no afecten el funcionamiento del sistema.

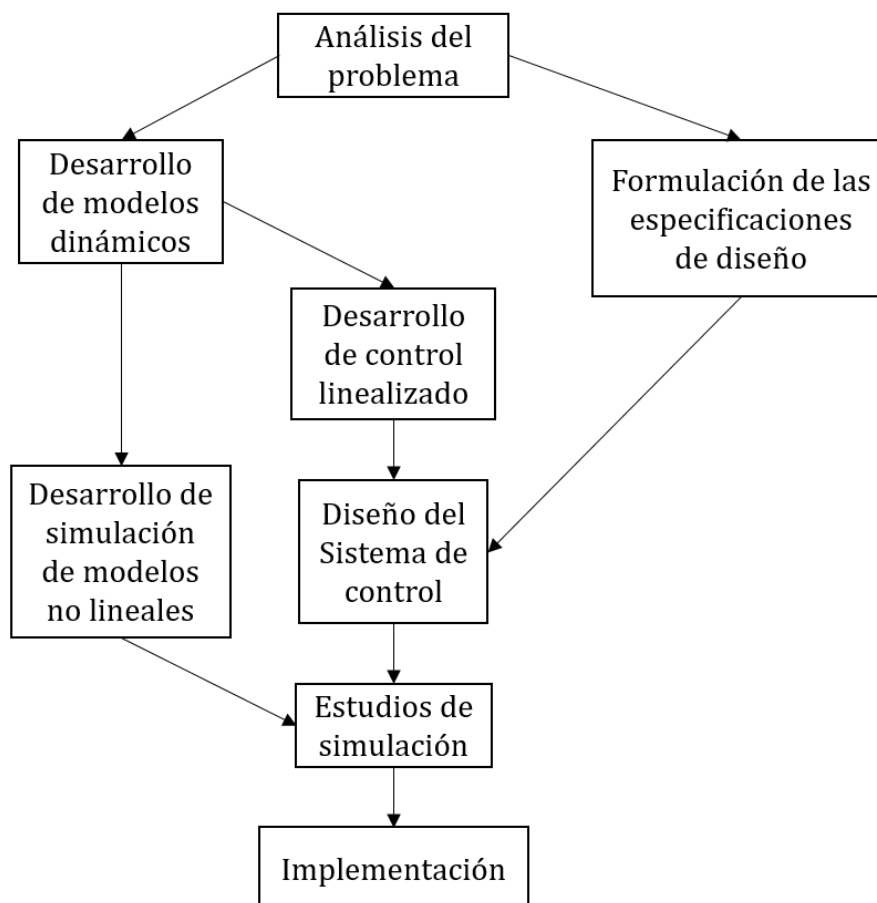


Figura 13: Metodología de diseño de sistemas de control. (Fuente: Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

- **Desarrollo de la simulación.** A modo de probar la operación de un diseño de controlador, se simula el sistema utilizando modelos no lineales. Si es posible, dichos modelos son validados en contraste con datos reales.

- **Estudios de la simulación.** Una vez diseñado un controlador tentativo para el sistema linealizados, el modelo de simulación no lineal es utilizado en conjunto con dicho controlador tentativo a modo de obtener información más real sobre el comportamiento del sistema.
- **Implementación.** Al obtener un diseño adecuado, el controlador es implementado en la turbina y probado en terreno.

Cabe destacar que el proceso antes descrito es de carácter iterativo y usualmente se deben redefinir objetivos de control, modelos o rediseñar el controlador.

3.7.2.2 Otros diseños de control dinámico

Otros enfoques de diseño que se desvían o mejoran el modelo de diseño clásico antes expuesto son el control adaptativo, control óptimo, algoritmos de búsqueda y el diseño robusto con retroalimentación cuantitativa. Todos estos pueden presentar ventajas sobre los métodos lineales de diseño de control clásicos, especial en sistemas no lineales.

Control Adaptativo

El comportamiento dinámico de una turbina eólica es altamente dependiente de la velocidad del viento debido a la relación no lineal entre la velocidad del viento, el torque de la turbina y el ángulo de inclinación de las aspas. Las variaciones en los parámetros del sistema pueden ser ajustadas al diseñar un controlador con baja sensibilidad a los cambios de dichos parámetros. Este esquema de control es particularmente útil en casos en los cuales los parámetros cambian rápidamente o en un rango muy amplio, ya que se mide constantemente el valor de los parámetros del sistema y en respuesta a las variaciones se realizan cambios en la dinámica del sistema de control a fin de asegurar que el comportamiento deseado sea logrado.

Control Óptimo

El diseño óptimo es un enfoque en el que las variaciones en las salidas del sistema son contrastadas con las variaciones en la señal de entrada. Éste tipo de diseño es inherentemente multivariable, lo que lo hace adecuado para el diseño del control de una turbina eólica de velocidad variable. El problema es formulado en términos de un índice de desempeño del sistema, el cual usualmente es una función del error entre las acciones ordenadas y la respuesta real del sistema. Luego, modelos matemáticos complejos son utilizados para determinar qué valores de los parámetros de diseño maximizan o minimizan el valor del índice de desempeño. Los algoritmos de control óptimo necesitan de la medición de múltiples variables de estado del sistema.

Algoritmos de Búsqueda

Este tipo de algoritmo constantemente hace cambios en los parámetros del sistema y mide los resultados en la salida en respuesta a dichos cambios. En respuesta a las mediciones el modelo ajusta los cambios realizados a modo de mantener la respuesta óptima en todo momento.

Control Robusto con Retroalimentación Cuantitativa

Similar al diseño de control del enfoque “clásico”, este modelo de control emplea niveles de frecuencia para diseñar controles robustos para sistemas con dinámicas inciertas. En éste se utilizan métodos para diseñar sistemas de control de lazo cerrado con criterios de estabilidad y desempeño específicos para un rango definido de parámetros de operación, lo que asegura que dicho controlador realizará su acción de debida manera en el rango establecido.

3.7.2.3 Modelos de sistemas para turbinas eólicas

Los modelos de sistema utilizados para el diseño de controladores son usualmente modelos matemáticos basados en principios físicos. En la eventualidad de que dichos modelos no puedan ser desarrollados, un enfoque experimental llamado “identificación de sistema” puede ser utilizado.

Modelos Basados en Principios Físicos

Modelos dinámicos son utilizados para entender, analizar y caracterizar la dinámica del sistema para el diseño de un controlador. Estos modelos consisten de una o más ecuaciones diferenciales que describen la operación del sistema. Normalmente estas ecuaciones están escritas en una de dos formas: la función de transferencia (*transfer function*) o el espacio de estado (*state space*). La primera involucra el uso de transformadas de Laplace y caracteriza el sistema en un dominio de frecuencia, mientras que la segunda caracteriza el sistema en un dominio de tiempo.

Identificación del Sistema

En los casos en que los modelos de las perturbaciones o sistemas complicados no pueden ser determinados de manera sencilla en base a principios físicos, el enfoque experimental puede ser utilizado para identificar el sistema. Este método está compuesto de cuatro pasos principales:

1. Planeación de experimentos.
2. Selección de una estructura para el modelo.
3. Estimación de los parámetros del modelo.
4. Validación del modelo.

La identificación del sistema incluye la medición de las salidas del sistema en respuesta a una señal de entrada, y/o la medición de las entradas del sistema. Los enfoques más simples para la identificación del sistema requieren de entradas sinusoidales o en pulsos. Otros enfoques pueden utilizar cualquier entrada, pero requieren de mayor capacidad computacional para determinar el modelo apropiado. En general, las señales de entrada deben ser escogidas a modo de afectar todos los modos del sistema lo suficiente para generar una respuesta medible en la salida y así identificar la dinámica del sistema.

Los datos entregados por los experimentos son utilizados para ajustar los parámetros de un modelo del sistema. El modelo del sistema puede estar basado en conocimiento previo sobre su comportamiento. En el caso de sistemas que se comportan de manera lineal en un cierto rango de operación es posible usar modelos de “caja negra”, donde los parámetros y el orden

del modelo no están identificados. Además, es posible disminuir la cantidad de parámetros desconocidos basándose en modelos físicos.

La estimación de parámetros en usualmente trata como un problema de optimización utilizando algún tipo de criterio que permita que estos se ajusten a los datos. Los métodos *online* permiten la estimación de los parámetros mientras los datos están siendo recogidos y son útiles en sistemas que varían en el tiempo o para el uso de control adaptativo. Por su parte, los métodos *offline* cuentan con mayor confiabilidad y precisión.

Una vez que los parámetros del modelo son determinados es necesario validarlo. Para ello usualmente se prueba la respuesta ante variaciones paso a paso, determinando los errores en las predicciones del modelo. Dependiendo de la sensibilidad del sistema y la respuesta a las variaciones se determina si es necesario repetir el proceso para desarrollar un modelo más adecuado.

3.7.3 Implementación del Sistema de Control Dinámico

El control dinámico puede ser implementado en forma de sistemas mecánicos, circuitos eléctricos análogos, utilizando electrónica digital, o como combinación de las anteriores. El control vía mecanismos es utilizado comúnmente en turbinas eólicas relativamente pequeñas, mientras que la mayor parte de las turbinas hacen uso de una combinación de circuitos análogos y digitales o solamente circuitos digitales.

3.7.3.1 Sistemas de control mecánicos

El control dinámico basado en mecanismos hace uso de acoples, resortes y pesos para generar acciones en el sistema en respuesta a señales de entrada. Algunos ejemplos de sistemas de control vía mecanismos son las veletas de cola que orientan la turbina en dirección del viento o mecanismos de inclinación del aspa que varían el ángulo de ataque en respuesta a las fuerzas aerodinámicas o la velocidad del rotor.

3.7.3.2 Sistemas de control por circuitos eléctricos análogos

Usualmente, los circuitos eléctricos análogos son implementados como controladores distribuidos en una red de control que los engloba. Cuando el algoritmo de control ha sido desarrollado y probado, éste se cablea en circuitos integrados que son durables y de fácil fabricación. Este tipo de controladores presentan la ventaja de operar independiente del sistema de control supervisor, mientras que una de sus mayores desventajas radica en que cualquier cambio que se deba hacer en dicho algoritmo requiere reemplazar el circuito integrado por completo.

3.7.3.3 Sistemas de control digitales

A diferencia de los sistemas de control análogos, que responden de manera continua a señales de entrada continuas como fuerzas o voltajes, muchos de los sistemas de control modernos son implementados mediante controladores digitales que responden periódicamente a datos que son recopilados de manera discreta. Los controladores digitales son implementados utilizando computadores, lo que permite que los algoritmos utilizados sean modificables de manera fácil y rápida, además de favorecer la centralización del control. Esto último resulta en menores costos en términos de *hardware* y de cableado de circuitos

integrados. Además, los sistemas de control digital permiten una fácil implementación de modelos de control no lineales, lo que en varias ocasiones resulta en un mejor comportamiento que el obtenido utilizando sólo controladores lineales.

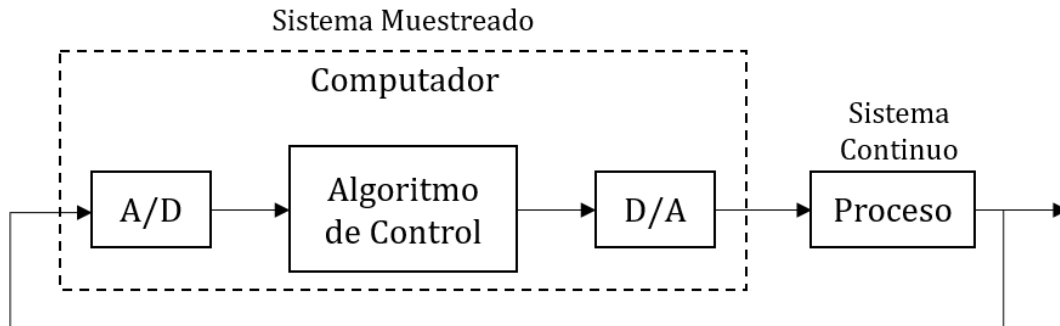


Figura 14: Esquema de un sistema controlado por CPU. (Fuente: Reproducción de Reproducción de Mawell et al. (2009)^[5]).

Para hacer posible el uso de controladores digitales es necesario que estos se comuniquen con sensores y actuadores análogos, como se observa en la Fig. 14. Es por esto que la unidad central de procesamiento (CPU) necesita de convertidores analógico a digital (A/D), para convertir las señales análogas de entrada que envían los sensores en información digital; y de convertidores digital a analógico (D/A), para transformar los comandos digitales de control en voltaje analógico para su amplificación para los actuadores. Dependiendo de la distancia que la información digital necesite recorrer y el nivel de ruido que se quiera evitar, distintos tipos de protocolos de comunicación digital serán necesarios.

Por último, debido a que el proceso de control digital no es continuo su relación con los convertidores A/D da lugar a problemas. La tasa de muestreo afecta directamente la frecuencia de la información procesada, el diseño de los componentes del sistema de control y la estabilidad del mismo.

La tasa de muestreo determina la frecuencia del contenido captado. En casos específicos dicha frecuencia evitará la recopilación de información útil para las acciones de control. La tasa de muestro también afecta el diseño del sistema de control, ya que la dinámica de un controlador digital depende de ésta, pues determina los valores de las constantes del controlador y la frecuencia natural del sistema. Esto también significa que cambios en la tasa de muestreo pueden significar que un sistema de control digital estable se vuelva inestable.

3.8 Control Electrónico

3.8.1 Retroalimentación (*Feedback*)

Un sistema dinámico es un sistema cuyo comportamiento varía en el tiempo, generalmente en respuesta a un estímulo o fuerza externa. El término *feedback* se refiere a la situación en que dos o más sistemas están conectados de tal manera que cada sistema influencia a los demás y, en consecuencia, sus dinámicas se encuentran fuertemente acopladas.

Debido a la naturaleza cíclica de la retroalimentación su comportamiento es usualmente contra-intuitivo y la predicción en base a razonamiento de causa-efecto se hace difícil, por lo que es necesario recurrir a métodos formales para analizar el sistema como un todo.

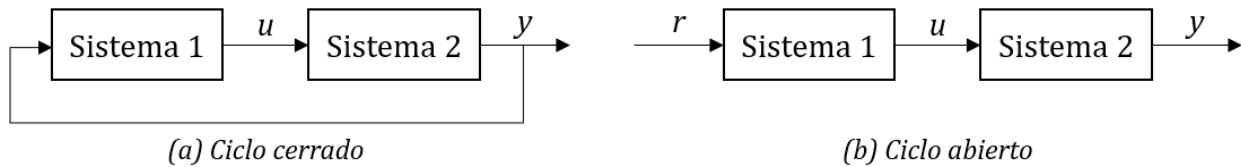


Figura 15: (a) Esquema de un sistema de ciclo cerrado. La salida del sistema 1 es la entrada del sistema 2, mientras que la salida de este es la entrada al sistema 1. (b) Esquema de un sistema de ciclo abierto. La salida del sistema 2 no es utilizada como entrada para el sistema 1. (Fuente: Reproducción de Åström y Murray (2009)^[6]).

La retroalimentación posee varias propiedades que pueden ser aprovechadas para el diseño de sistemas. Puede ser utilizada para hacer que un sistema se haga resiliente ante influencias externas. También puede ser usada para crear un comportamiento lineal en función de componentes no-lineales. En general, el *feedback* permite que un sistema sea insensible tanto a perturbaciones externas como a variaciones individuales en los elementos que lo conforman.

Por otro lado, las desventajas que conlleva el uso de retroalimentación son que puede crear inestabilidades dinámicas, las que causan oscilación o incluso pérdida de control en el comportamiento. Además, el *feedback* puede introducir ruido de los sensores en el sistema, lo que requerirá que las señales sean filtradas adecuadamente.

3.8.2 Control

Con respecto al tema particular de este trabajo, definimos control como el uso de algoritmos y retroalimentación en sistemas de ingeniería. En esencia, el control es una ciencia de la información que hace uso tanto de señales análogas como digitales.

Un controlador moderno recopila información de la operación de un sistema, la compara con el comportamiento deseado, computa acciones correctivas en base a un modelo de la respuesta del sistema a entradas externas y las ejecuta por medio de actuadores a modo de obtener el efecto deseado. Este *loop* de retroalimentación básico de sensar, computar y actuar es el concepto central del control. Por otro lado, es clave para el diseño de la lógica de control que se asegure que la dinámica del ciclo cerrado sea estable (perturbaciones acotadas producen errores acotados) y que presente cualidades deseables (respuesta rápida, buena atenuación de perturbaciones, etc.). Estas propiedades son establecidas haciendo uso de técnicas de análisis y modelación que permiten la caracterización de las dinámicas esenciales del sistema y su posible comportamiento ante incertidumbre, ruido y falla de componentes.

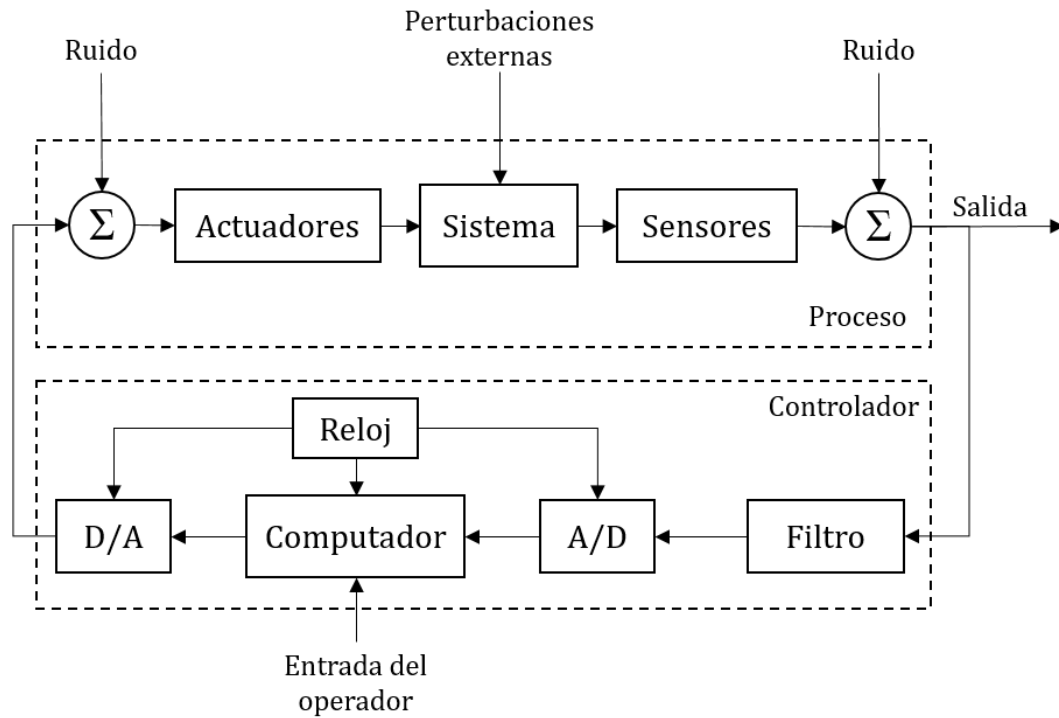


Figura 16: Componentes de un sistema controlado por un computador. Los elementos encerrados por la línea segmentada en la parte superior representan las dinámicas del sistema, mientras que los elementos inferiores representan el controlador. (Fuente: Reproducción de Åström y Murray (2009)^[6]).

3.8.3 Controlador PID

Un controlador proporcional-integral-derivativo o PID es un método de regulación de carga retroalimentado que se basa en el error entre un valor medido y un valor deseado. En general, la señal de control \mathbf{u} está formada por una ponderación del error y los factores peso proporcional k_p , integral k_i y derivativo k_d . Donde \mathbf{u} , para un controlador PID ideal, está dada por:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (9)$$

Donde $\mathbf{e}(t)$ es el error entre el valor medido y el valor deseado para un tiempo t . El diagrama de la Fig. 17 muestra el funcionamiento de un controlador PID ideal. El valor medido $\mathbf{y}(t)$ es comparado al valor de referencia \mathbf{r} , luego es ponderado por los factores peso del controlador para generar una señal $\mathbf{u}(t)$ que regula la planta $\mathbf{M}(t)$ (en nuestro caso, la potencia y dirección de giro del motor). El resultado de la acción de control es medido y comparado nuevamente con la referencia, creando un ciclo cerrado retroalimentado.

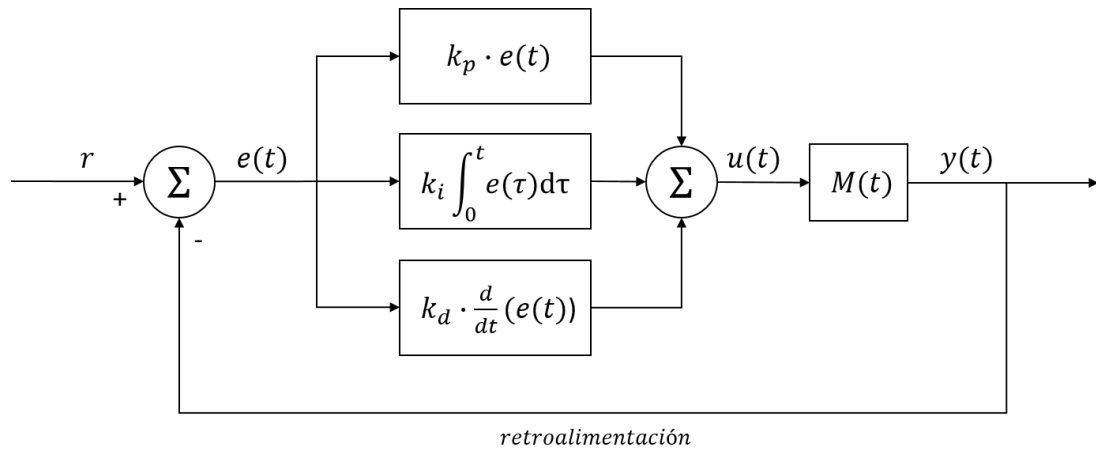


Figura 17: Diagrama de bloques de un ciclo cerrado de control con PID. (Fuente: elaboración propia).

Cada uno de los factores peso del controlador cumple una función específica en la regulación de la señal de control. El factor proporcional se encarga de corregir en proporción al error, por lo que, al acercarse el error a cero, también lo hace la corrección y por lo tanto nunca se logra obtener el valor deseado. En consecuencia, los otros dos factores son necesarios para ajustar la señal de control. El factor integral acumula las lecturas de error de la acción integral en el tiempo a modo de incrementar la señal de control a medida que esta se acerca a cero. Sin embargo, el uso del factor integral puede generar un “rebalse” y generar oscilaciones cuando el tiempo de acción se hace muy prolongado, por lo que existen diversas técnicas para evitarlo. Por su parte, el factor derivativo se encarga de disminuir la señal de control en función de la tasa de cambio del error, lo que permite controlar la oscilación a medida que la señal de control se vuelve estable. La Fig.18 muestra la respuesta a un cambio en el valor de referencia de un controlador proporcional (a), un controlador PI (b) y un controlador PID(c).

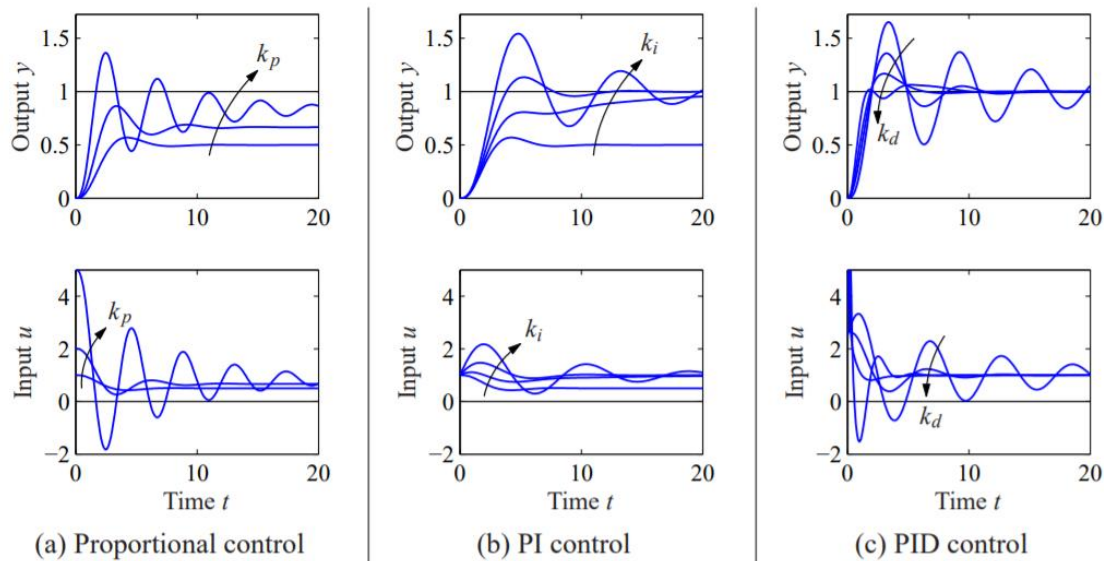


Figura 18: Respuesta a un cambio en el valor de referencia. (a) Controlador proporcional con $k_p=1, 2$ y 5 . (b) Controlador PI con $k_p=1, k_i=0, 0.2, 0.5$ y 1 . (c) Controlador PID con $k_p=2.5, k_i=1.5$ y $k_d=0, 1, 2$ y 4 . (Fuente: Reproducción de Åström y Murray (2009)^[6]).

Cabe mencionar que para cada uno de estos factores existen valores óptimos que dependen principalmente de la materialidad del sistema y que existen tanto métodos empíricos como analíticos para determinar esos valores. Además, el uso de los tres factores no es necesario en todos los sistemas e inclusive puede llegar a ser perjudicial para la estabilidad de la acción de control.

3.8.4 Método Ziegler-Nichols

Gracias a que el controlador PID consta de tan pocos parámetros, múltiples métodos empíricos para su ajuste han sido desarrollados a modo de evitar modelar la dinámica del sistema por medio de métodos convencionales. En la década de 1940, Ziegler y Nichols desarrollaron dos métodos de ajuste para controladores PID basados en una caracterización simple de la dinámica del sistema en los dominios de tiempo y frecuencia.

El método en dominio temporal se basa en la medición de la respuesta que tiene el proceso en ciclo abierto ante una perturbación unitaria. La respuesta es caracterizada por los parámetros a y τ , que corresponden a las intersecciones con los ejes de coordenadas de la tangente a la mayor pendiente de la respuesta (Fig. 19). Cabe destacar que no es necesario obtener estado estacionario en la respuesta para caracterizar el sistema, basta con llegar a un punto de inflexión.

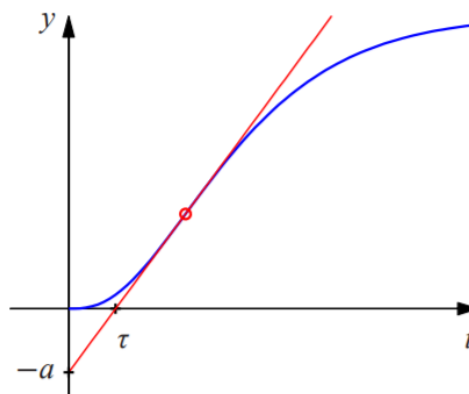


Figura 19: Obtención de los parámetros a y τ por medio del método Ziegler-Nichols en dominio temporal. (Fuente: Reproducción de Åström y Murray (2009)^[6]).

En el método en dominio frecuencial, un controlador PID es agregado al proceso, los factores integral y derivativo son ajustados a cero y el factor proporcional es aumentado hasta que el sistema comienza a oscilar. El factor proporcional crítico k_c es registrado en conjunto con el periodo de oscilación T_c .

Por medio de extensiva simulación en un amplio rango de procesos representativos, Ziegler y Nichols buscaron correlaciones que sirvieran para ajustar los parámetros de un controlador PID, lo que resultó en la Tabla 1.

Tabla 1: Reglas de ajuste para el método de Ziegler-Nichols. (a) El método de respuesta en dominio temporal entrega los valores en términos de los parámetros a y τ . (b) El método en dominio frecuencial entrega valores en términos de k_c y T_c .

Tipo	k_p	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0.9/a$	3τ	
PID	$1.2/a$	2τ	0.5τ

(a) Método de respuesta al paso

Tipo	k_p	T_i	T_d
P	$0.5k_c$		
PI	$0.4k_c$	$0.8T_c$	
PID	$0.6k_c$	$0.5T_c$	$0.125T_c$

(b) Método de respuesta a la frecuencia

Es importante mencionar que, si bien los métodos Ziegler-Nichols causaron un inmenso impacto al ser introducidos, las reglas de ajustes aportadas utilizan muy poca información del proceso a controlar y, en consecuencia, los sistemas de ciclo cerrado obtenidos carecen de robustez. Sin embargo, existen múltiples versiones mejoradas de las reglas de ajuste.

4 ESTADO DEL ARTE

La energía del viento ha sido aprovechada por los seres humanos de diversas maneras desde la antigüedad. Ya sea en botes y barcos a vela como fuente impulso para el transporte o en molinos de trigo como fuente de movimiento para realizar el trabajo mecánico necesario, el viento ha sido aprovechado y controlado a fin de lograr hacer uso de él para realizar trabajos específicos.

La generación de energía eléctrica por medio del aprovechamiento del viento es una de las variantes más recientes de la energía eólica. Sin embargo, en su relativamente corta existencia, la técnica referente a la recolección de la energía del viento ha implementado diversas formas de regular y optimizar el proceso de extracción a modo de hacer uso efectivo del potencial eólico.

4.1 Sistemas de Control en la Industria

El propósito de un sistema de control en una turbina eólica es lograr que ésta opere de manera automática y segura. Esta operación usualmente se diseña a modo de maximizar la captura anual de energía en conjunto con minimizar las cargas a las que se somete la turbina. Los sistemas de control de una turbina eólica son divididos funcionalmente en tres partes que trabajan de manera jerárquica en ciclos intercomunicados:

- 1) Un controlador que administra las múltiples turbinas de una granja eólica.
- 2) Un controlador supervisor que opera cada turbina por separado.
- 3) Varios controladores dinámicos que operan los distintos subsistemas de cada turbina.

Si bien los sistemas de control varían significativamente para distintas turbinas, existen ejemplos de control que han sido replicados y mejorados durante el desarrollo de la técnica de extracción de energía eólica. A continuación, se presenta una recopilación de sistemas de control que han utilizado distintos modelos de turbinas en la industria.

4.1.1 Bergey Excel

La turbina eólica *Excel* de la compañía *Bergey Wind Power* es una turbina que cuenta con dos sistemas de control físico y un controlador digital (encargado de regular la potencia generada de acuerdo a la aplicación que se le dará).

Los **sistemas de control físicos** (*hardware controllers*) se encargan de mantener la turbina orientada en dirección de viento y proteger el rotor de sobrepasar la velocidad deseada en vientos extremos. Lo primero es logrado por medio de una **veleta de cola** que orienta la punta del rotor por medio de las fuerzas aerodinámicas que se generan en su superficie. En cuanto al control de la velocidad del rotor, la forma de éste genera que cuando el viento supera los 15 [m/s] la punta se desvía parcialmente de la dirección del flujo.



Figura 20: Turbina Bergey Excel.

4.1.2 Siemens SWT-2.3-82

La turbina eólica **Siemens SWT-2.3-82** es una turbina que posee un rotor capaz de operar a dos velocidades distintas prácticamente constantes por medio de **regulación activa por stall**. Esta última se realiza por medio de un mecanismo que se encarga de modificar la inclinación de las aspas a modo de que se produzca la entrada en pérdida de sustentación, lo que además provee la posibilidad de ejercer freno aerodinámico en caso de una parada de emergencia.

4.1.3 Vestas V90

Las turbinas **Vestas V90** incluyen control de inclinación de aspa activo y trabajan en un rango de velocidad de operación semi-variable gracias al diseño de su generador. **El sistema de inclinación de aspa** es utilizado para regular la potencia media que entrega la turbina. Las variaciones en la potencia media son reducidas permitiendo que el rotor gire a velocidades que varían entre 9 [rpm] a 14.9 [rpm]. El frenado se logra inclinando las aspas para que sean “paralelas” al flujo. Cabe destacar que todas las funciones antes mencionadas se logran por medio de microprocesadores.



Figura 21: Turbina Vestas V90.

4.1.4 Ecotécnia 80

En contraste con las turbinas Siemens y Vestas, que trabajan a velocidades constantes, el generador de inducción de doble alimentación de la turbina Ecotécnia 80 posee un inversor en el rotor, lo que permite variar la velocidad de operación a cualquier valor dentro de su rango de operación. Esto hace posible que la velocidad del rotor de las aspas se mueva entre 9.7 y 19.9 [rpm], lo que significa un rango de trabajo de 1000 a 1800 [rpm] para el rotor del generador. Al igual que otras turbinas con **control activo de la inclinación de aspa**, el sistema permite regular la potencia entregada y es posible usarlo para frenar aerodinámicamente el rotor. Adicionalmente, la turbina Ecotécnia 80 es capaz de inclinar las aspas de manera independiente, lo que la dota de la posibilidad de compensar en caso de que alguna aspa no entregue el rendimiento deseado y de reducir cargas en la transmisión. Posee acelerómetros cuyas mediciones ayudan a regular la inclinación a modo de minimizar las vibraciones del tren de transmisión.

4.1.5 DeWind D8.2

La turbina DeWind D8.2 es otra turbina que opera a velocidad variable. En este caso, el generador sincrónico está conectado a un convertidor de torque que se encarga de transmitir el movimiento desde el tren de transmisión de velocidad variable. Al igual que los casos anteriores, el **control activo de inclinación de aspa** se encarga de regular la potencia entregada al afectar la velocidad del rotor.

4.2 Nuevos Sistemas de Control

Debido al crecimiento sostenido en el uso de energías renovables, en los últimos años se ha llevado a cabo el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan que este tipo de energías puedan ser competitivas en términos económicos con las energías de fuentes convencionales.

En las últimas décadas se ha logrado disminuir el Costo de la Energía (**COE**) mediante la fabricación de rotores de mayor tamaño, sin embargo, esto ha resultado en que los **métodos de control pasivos** anteriormente utilizados no sean aptos para asegurar que las cargas sobre la máquina sean las adecuadas, lo que ha volcado la investigación hacia los **métodos de control activos**.^[4]

Si bien la mayor parte de las turbinas de gran tamaño utilizan tecnologías de control activo, lo que les proporciona una mejor regulación de la potencia generada y de las cargas sobre la turbina, tecnologías como la inclinación activa de las aspas o la regulación de la velocidad del rotor no son capaces encargarse de las cargas oscilatorias que pueden ocurrir en presencia de una orientación desviada respecto al viento, cizalladura del viento, flujos ascendentes, inclinación del eje, remolinos o turbulencia en general.

A continuación, se presentan métodos de control más sofisticados que han sido desarrollados en respuesta a la problemática antes expuesta.

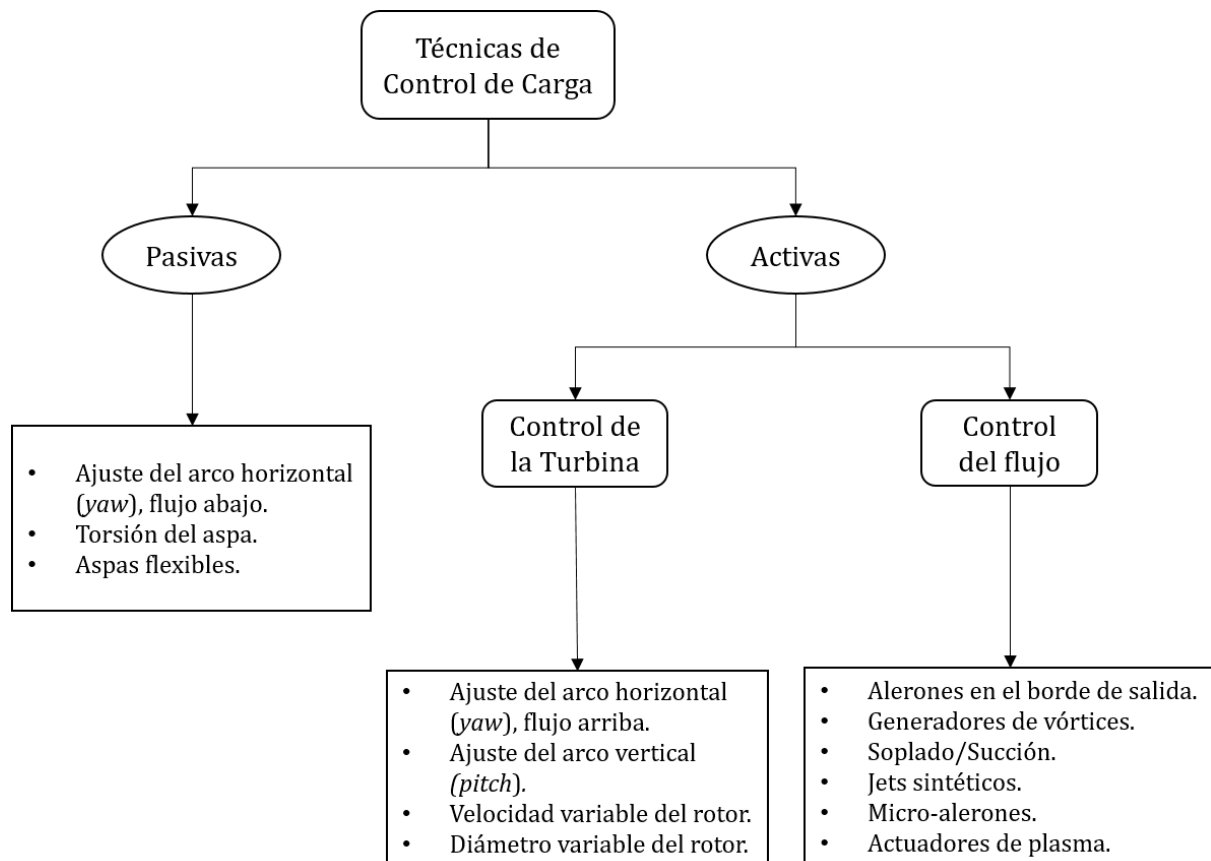


Figura 22: Diagrama de las técnicas control de carga. (Fuente: reproducción de Johnson et al. (2008)^[4]).

4.2.1 Control de Inclinación de Aspa Avanzado

El método tradicional de control de inclinación de aspa consiste en ajustarlas simultáneamente, logrando así limitar la potencia, optimizar la eficiencia del rotor o disminuir su velocidad.

Dos nuevos métodos que han sido investigados corresponden al **control cíclico de inclinación** y al **control individual de inclinación**. El primero varía el ángulo de inclinación del aspa con un cambio de fase de 120° entre ellas a fin de alivianar las variaciones de carga causadas por inclinación del rotor o error de orientación con respecto al viento. Por su parte, el segundo método ajusta cada aspa de manera independiente y requiere de la medición del flujo local sobre cada una de ellas. El uso de ambos métodos en conjunto permitiría crear dos sistemas de reducción de carga, donde el control cíclico utilizado para mantener la potencia generada al nivel deseado y el control individual minimiza las cargas sin afectar la captación de energía.

4.2.1.1 Antecedentes

Según los estudios realizados por *Larsen et al. (2004)*^[7] y por *Bossanyi (2004)*^[8], si bien los métodos antes mencionados pueden reducir las cargas de fatiga debido a error en la orientación del rotor, cizalladura del viento, flujo ascendente o inclinación del eje, también son menos capaces de reducir las cargas que se originan por remolinos y turbulencia. En particular los estudios arrojaron una reducción de alrededor de un 30% en las cargas por fatiga.

4.2.1.2 Implementación y Desafíos

En lo que se refiere a la implementación del control de inclinación individual, existen tres situaciones que representan mayor preocupación:

- 1) Si bien la inclinación de cada aspa es independiente, aún es necesario inclinar la totalidad de ésta, lo que no es ideal debido a que las condiciones locales sobre la superficie no son uniformes.
- 2) El mecanismo que realiza el cambio de orientación del aspa puede no reaccionar con la velocidad requerida y, en consecuencia, fallar en aliviar las cargas oscilatorias.
- 3) El control de inclinación de aspa individual puede resultar el uso excesivo del sistema.

Por lo tanto, los desafíos en la implementación incluyen el alcanzar un tiempo de respuesta adecuado, el uso de motores con mejores especificaciones y la energía requerida para operar el sistema bajo este método de control.

4.2.2 Control de Torsión del Aspa

Gracias al advenimiento de los materiales compuestos y sus propiedades, actualmente es posible diseñar aspas con propiedades aeroelásticas específicas. Esto significa que dichas aspas están diseñadas para que la distribución de su torsión cambie a medida que éstas se flectan por acción de las cargas aerodinámicas. En consecuencia, las cargas intermitentes debido a remolinos se verían, teóricamente, reducidas debido a la torsión del aspa hacia ángulos de ataque menores y el uso del sistema de inclinación de aspa sería menor.

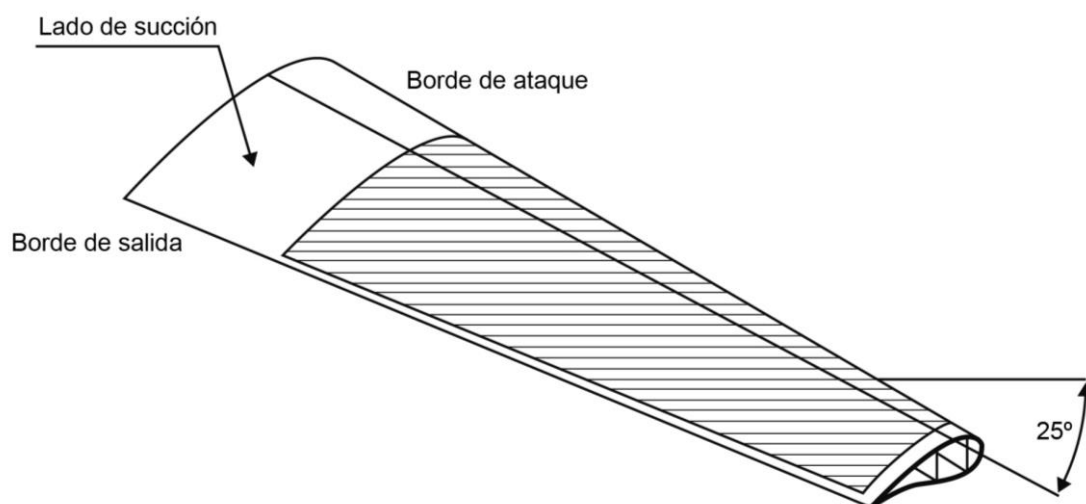


Figura 23: Esquema de una aspa de material compuesto para torsión pasiva. Debido a que las fibras de refuerzo del material se encuentran orientadas en un ángulo de 25° respecto al eje del aspa, al soportar flexión por acción del viento se producirá una torsión que reducirá las cargas sobre ésta. (Fuente: elaboración propia).

4.2.2.1 Antecedentes

De acuerdo a los estudios realizados por Lobitz y Veers (1999)^[9], el acoplamiento flexión-torsión puede reducir las cargas de fatiga entre un 20% y un 30%.

4.2.2.2 Implementación y Desafíos

Los tres desafíos principales con los que se encuentra este concepto son:

- 1) Captura de energía reducida debido a que el aspa diseñada para una captura óptima se verá modificada por las cargas sobre ella.
- 2) Costos mayores asociados a los materiales y técnicas de fabricación.
- 3) La integridad del aspa se puede ver comprometida debido a la fabricación y esto puede conllevar una menor rigidez y la necesidad de material adicional.

Por otro lado, el **control de torsión activo** es conceptualmente posible de conseguir por medio de la incrustación de láminas activas a lo largo del aspa. Sin embargo, la integridad estructural, el costo de los materiales activos y los requerimientos de energía de los actuadores siguen estando presentes como desafíos que enfrentar.

4.2.3 Rotor de Diámetro Variable

Un rotor de diámetro variable es capaz de mejorar la captura de energía en vientos de baja velocidad y de reducir las cargas sobre el rotor en vientos de alta velocidad. Los rotores de diámetro variable operan extendiendo o retrayendo una “aspa punta” desde el “aspa raíz”, como se puede observar en la Fig. 24. Durante vientos de baja velocidad, un diámetro de rotor mayor provee una mayor área de captura a costo de cargas flectantes mayores en la base del aspa y en la base de la torre. En caso de vientos fuertes, el diámetro del rotor es disminuido para evitar cargas excesivas. Su uso en conjunto con el sistema de inclinación de aspa permitiría que el sistema de diámetro variable responda a grandes cambios en la velocidad del viento, mientras que el primero se encargaría de regular la potencia.

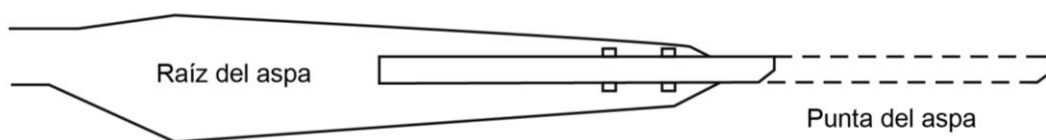


Figura 24: Ilustración de un aspa extensible (Fuente: reproducción de Johnson et al. (2008)^[4]).

4.2.3.1 Antecedentes

Una colaboración entre el Departamento de Energía de los E.E.U.U., *Energy Unlimited y Knight and Carver*^[10] manufacturó y probó aspas con el diseño de la Fig. 25 en una turbina de 120 [kW]. Las aspas eran capaces de ajustar su longitud desde 8 [m] a 12 [m], y en general se probó un aumento de la producción de energía de entre un 20-50% sobre el aspa estándar a velocidades de 7 a 9 [m/s]. Sin embargo, se observó una disminución en el rendimiento a velocidad nominal del rotor.

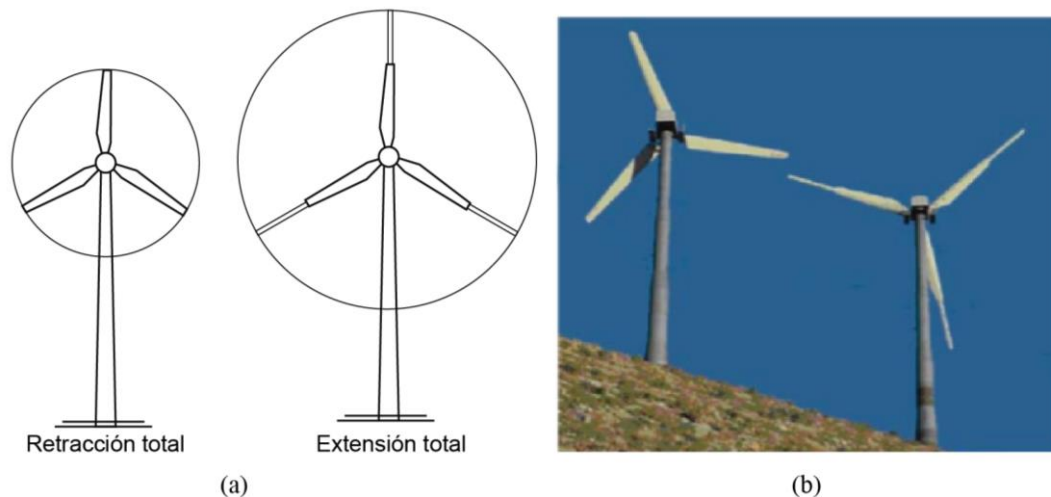


Figura 25: (a) Ilustración del sistema de rotor de diámetro variable. (b) Fotografía de las pruebas. (Fuente: Reproducción de DOE^[10]).

4.2.3.2 Implementación y Desafíos

Los resultados iniciales demuestran que el concepto funciona. Sin embargo, existen desafíos ingenieriles que deben ser abordados:

- 1) El desarrollo de modelos de control complejos.
- 2) La necesidad de una alta eficiencia aerodinámica.
- 3) El incremento del peso de las aspas.
- 4) La problemática general referente a la durabilidad y confiabilidad del sistema.

4.3 Control Activo del Flujo

Corresponde al manejo del flujo local de aire que rodea el aspa. Si bien el usualmente el propósito del control de flujo es mejorar el desempeño aerodinámico de un perfil alar o una superficie sustentadora, en turbinas de gran tamaño su enfoque principal es el de reducir cargas extremas ante vientos de alta velocidad. Los dispositivos activos de control de carga o dispositivos “inteligentes” deben incluir actuadores y sensores distribuidos a lo largo de la envergadura del aspa, ya que el sistema debe ser capaz de percibir los cambios en el flujo local y realizar respuestas rápidas para contrarrestar los efectos negativos generados.

En general, la intención de los dispositivos de control de flujo es el de retrasar o adelantar la transición, suprimir o aumentar la turbulencia, o de prevenir o promover la separación. En consecuencia, se busca lograr la disminución del arrastre, el aumento de la sustentación, reducción de ruido, etc.

4.3.1 Alerones Convencionales

Los alerones han sido utilizados en turbinas eólicas para realizar frenado aerodinámico y controlar las cargas. Dependiendo de la rigidez del aspa, existen dos configuraciones en las que los alerones pueden ser utilizados para controlar la carga.^[11] En aspas rígidas, la deflexión en dirección a la superficie de presión incrementará la carga aerodinámica, mientras que la deflexión en dirección hacia la superficie de succión la disminuirá. En aspas que torsionalmente flexibles, la deflexión del alerón en dirección de la superficie de presión

provocará que el ángulo de ataque se reduzca, mientras que una deflexión contraria aumentará el ángulo de ataque y, en consecuencia, la carga aerodinámica.

Implementación y Desafíos

En general, los principales desafíos que presenta la implementación de alerones son:

- 1) Su gran tamaño y el peso adicional que aportan al aspa.
- 2) El complejo sistema de unión.
- 3) Alto tiempo de respuesta.
- 4) Requerimientos de energía adicional.
- 5) Ruido generado por los espacios que deja el alerón al ser emplazado.

4.3.2 Alerones no Convencionales

A modo de mejorar el desempeño logrado por los alerones tradicionales, los alerones no convencionales hacen uso de nuevas tecnologías como materiales piezoeléctricos, entre otros de materiales “inteligentes”. Sus principales ventajas sobre los alerones tradicionales son su bajo peso, su bajo tiempo de activación y que usan una menor porción de la cuerda. A continuación, se presentan tres dispositivos de este tipo.

4.3.2.1 Alerón Compacto

El alerón compacto es una versión escalada de un alerón convencional que utiliza actuadores piezoeléctricos ubicados en el interior del aspa para mover de manera rápida una barra de tensión que se encarga de deflecarlo. Su diseño compacto permite la activación rápida que se requiere para reducir las vibraciones en el rotor.

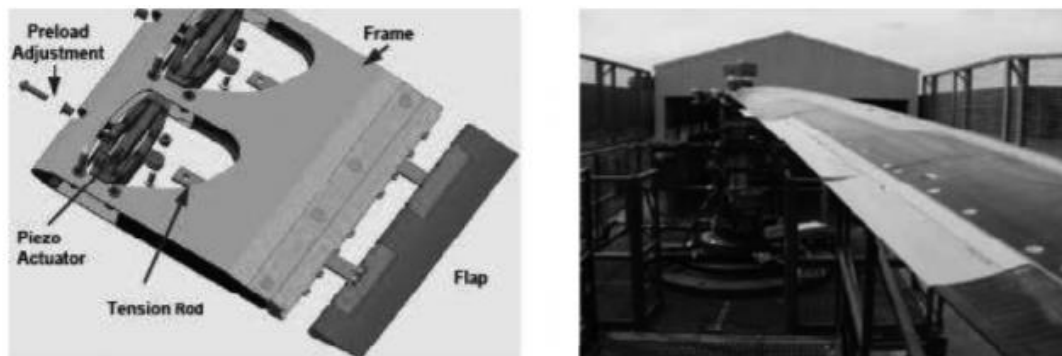


Figura 26: A la izquierda, un modelo CAD que muestra el diseño del alerón con actuadores piezoeléctricos (Fuente: Enenkl et al. (2002)^[12]). A la derecha una foto de los alerones instalados en un aspa BK117 (Fuente: Roth et al. (2006)^[13]).

Antecedentes

El proyecto ADASYS (una colaboración de Eurocopter, EADS CRC, Daimler Chrysler Research Labs y DLR)^[12-13] construyó un rotor a escala completa al que se realizaron pruebas que demostraron que el sistema lograba una reducción de 50-90% de las cargas vibratorias.

4.3.2.2 Adaptive Trailing Edge Geometry

La tecnología **ATEG**^[14-18] es un tipo de alerón deformable está constituido de actuadores piezoeléctricos que son unidos al perfil aerodinámico principal. La **ATEG** es capaz de deflectarse rápidamente y de manera independiente a lo largo de la envergadura del aspa, en un rango de ángulos entre los -3.0° a los $+1.8^\circ$, como se observa en la Fig. 27. Al deflectarse

hacia la superficie de succión, la curva de sustentación se desplaza hacia abajo. Mientras que al orientarse hacia la superficie de presión la curva de sustentación se mueve hacia arriba, aumentando en consecuencia las cargas aerodinámicas.

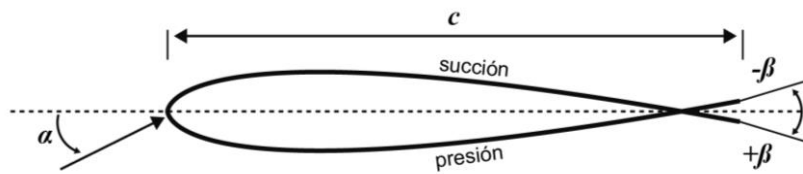


Figura 27: Ilustración del perfil principal con ATEG acoplado en el borde de salida. Se observan tres posiciones de ATEG. (Fuente: Reproducción de Bak et al. (2007)^[18]).

Antecedentes

Múltiples estudios han sido llevados a cabo con el fin de desarrollar el uso de ATEG en el control de turbinas eólicas. Estudios de aeroelasticidad 2D realizados por Buhl et al. (2005)^[16] mostraron que la tecnología es capaz de reducir la desviación estándar de la fuerza normal causada por vientos cambiantes sobre un perfil alar en hasta un 95% en el caso de subidas repentinas en la velocidad y en hasta 81% en casos de flujo turbulento (10% de intensidad). Un estudio similar realizado por Anderson et al. (2006)^[17] concluyó que existía una reducción de un 60% en el momento en la raíz del asa ante un viento turbulento de 10% de intensidad aplicado a un asa de 33 [m] con un ATEG de 7 [m]. Debido a los resultados anteriores, se construyó un modelo equipado con ATEG, sobre el cual Bak et al. (2007)^[18] realizaron pruebas estacionarias y dinámicas en túnel de viento a 40 [m/s] ($Re = 1.66 \times 10^6$). Las pruebas en estado estacionario demostraron que deflectar la ATEG en dirección a la superficie de presión en un ángulo de $\beta_{flap} = 1.5^\circ$ resultaba en un $\Delta C_L = +0.036$, mientras que una deflexión dirección contraria en un ángulo de $\beta_{flap} = -2.5^\circ$ resultaba en un $\Delta C_L = -0.066$. El arrastre no se vio afectado por la actuación. Por su parte, el estudio dinámico mostró que al variar el ángulo de la ATEG desde $\beta_{flap} = -3.0^\circ$ a 1.8° se podía obtener un $\Delta C_L = 0.10 - 0.13$ (dentro de la región lineal de la curva de sustentación del perfil), lo que se puede observar en la Fig. 28.

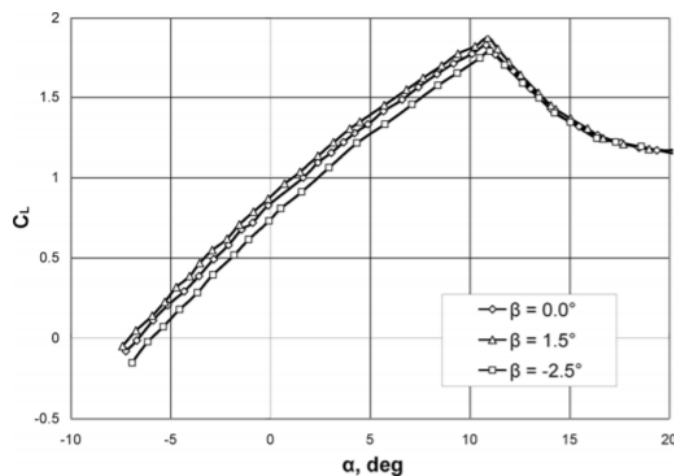


Figura 28: Perfil Risoe-B1-18 con ATEG instalado ante un flujo estacionario. C_L vs α para distintos ángulos del alerón. (Fuente: Fuglsang et al. (2004)^[19]).

4.3.2.3 Adaptive Compliant Wing

El *ACW* es un dispositivo desarrollado por FlexSys Inc.^[20] y los Laboratorios de Investigación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos. El mecanismo está constituido de elementos elásticamente deformables, los cuales son accionados por medio de actuadores electro-mecánicos convencionales para que el *ACW* modifique la forma del borde de salida. El dispositivo puede deformarse en un rango que va de los -10° a los $+10^\circ$, como se muestra en la Fig. 29, a velocidades de hasta $20[^\circ/s]$.^[21] Además, es capaz de torcerse de manera diferenciada a lo largo de la envergadura del modelo en razón de $1[^\circ/ft]$.^[21]

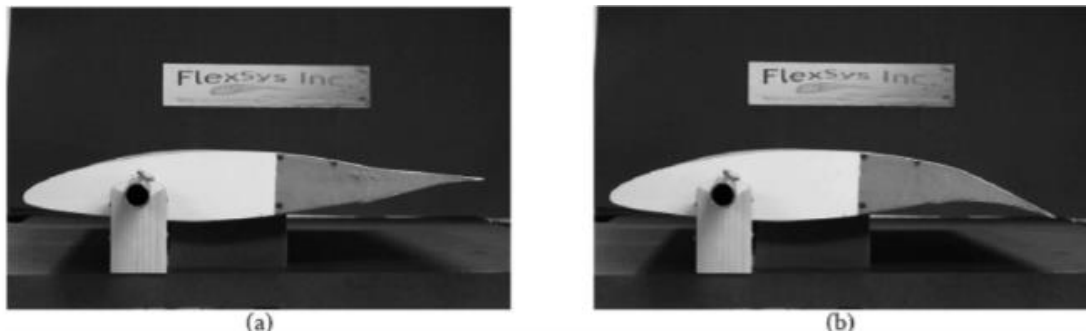


Figura 29: Modelo para túnel de viento de ACW. (a) Posición de -10° . (b) Posición de 10° . (Fuente: Kota et al. (2003)^[21]).

Antecedentes

Los desarrolladores de *ACW* condujeron pruebas en túnel de viento a modo de probar la capacidad de esta tecnología para aliviar cargas ocasionadas por remolinos. Al variar el ángulo del borde de salida entre -8° a 8° , las pruebas mostraron que el coeficiente de sustentación incrementaba desde 0.1 a 1.1 sin observarse un efecto importante en el arrastre.

4.3.3 Micro-alerones

Un micro-alerón tiene aproximadamente un 1-2% de la longitud de la cuerda. Es instalado en el borde de salida del perfil alar y es capaz de rotar 90° en ambas direcciones, como se observa en la Fig 30. Al rotarse hacia la superficie de succión se reduce la sustentación, mientras que al rotar hacia la superficie de presión ésta aumenta.

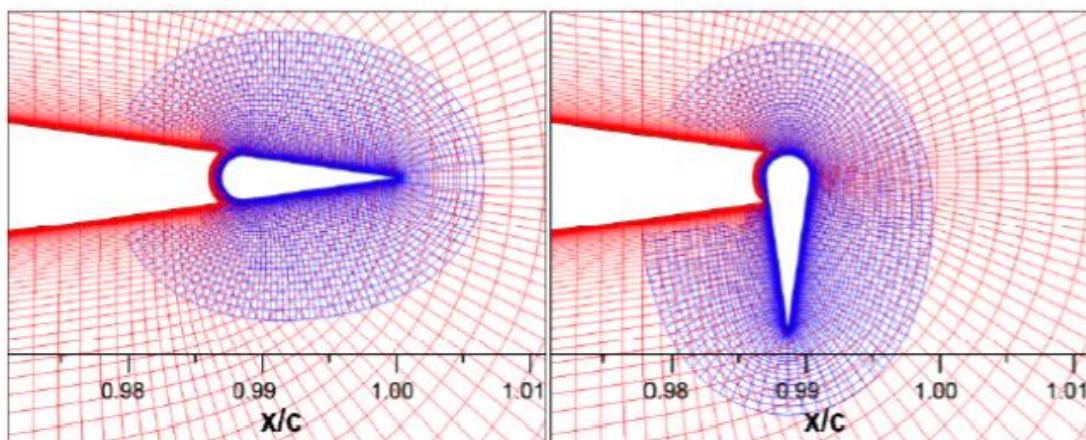


Figura 30: Micro-alerón en posición neutral y totalmente posicionado hacia abajo. (Fuente: van Dam et al. (2007)^[22]).

4.3.4 Pared Flexible Activa

La Pared Flexible Activa (*AFW* por sus siglas en inglés), es un dispositivo que detecta desviaciones en la separación de la capa límite y puede generar pequeñas perturbaciones a la altura del borde de ataque a modo de contrarrestar el crecimiento de la separación del flujo. Está constituida por un arreglo de transductores montados entre dos paredes. La pared externa es una lámina de Mylar cubierta de aluminio de 6 [μm] de espesor, mientras que la capa interna corresponde a una lámina de poliamida de 0.020 [mm] de espesor. El conjunto cuenta con un espesor total de unos 50-100 [μm]. Los transductores corresponden a tiras de cobre de dos tamaños que se disponen de manera alternada como se observa en la Fig. 31. La *AFG* es capaz de operar en modo sensor y modo actuador. En el primero, las vibraciones provocadas por el flujo sobre la capa externa son detectadas como una señal AC inducida entre el cobre y la capa de Mylar. Por su parte, el modo actuador aplica una señal de corriente alterna a las tiras de cobre que se encuentran cercanas al punto de separación, lo que genera vibraciones.

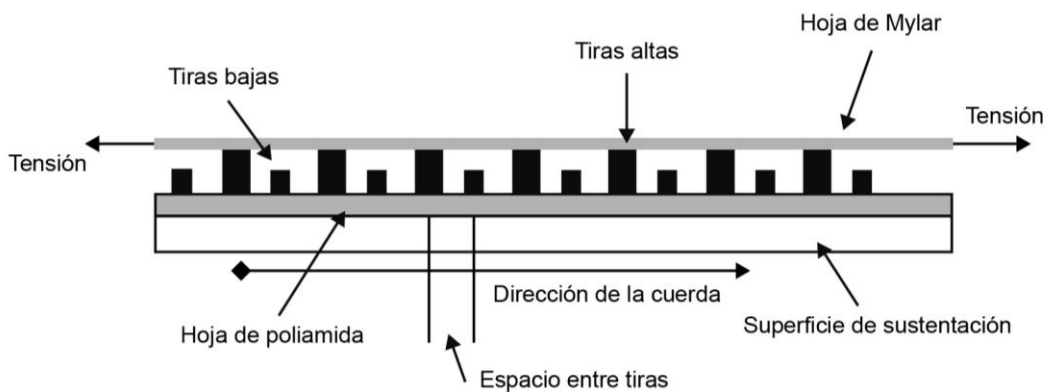


Figura 31: Esquema de la Pared Flexible Activa. (Fuente: Reproducción de Mangla y Sinha (2004)^[23]).

Antecedentes

Las investigaciones realizadas buscaban utilizar la *AFW* para retrasar la entrada en pérdida de sustentación en situaciones estáticas y dinámicas. Los experimentos estáticos demostraron que el punto de excitación óptimo se encontraba justo antes del punto de separación, lo que en condiciones apropiadas lograría retardar la separación y, en consecuencia, un aumento de un 4% del coeficiente de sustentación de la sección. Por su parte, los experimentos dinámicos mostraron ser capaces de retrasar la entrada en pérdida de sustentación del perfil en un 9% (desde $\alpha=19.6^\circ$ a $\alpha=20.4^\circ$).

Implementación y Desafíos

Las principales ventajas de la *AFW* son su fácil adaptación al aspa sin mayores modificaciones, su bajo requerimiento energético, el hecho de que no afecta el flujo cuando se encuentra inactiva y su capacidad para ser usada tanto como sensor como actuador. Por otro lado, debido a la ubicación cercana al borde de ataque, es posible que el dispositivo presente problemas al dañarse o ensuciarse.

4.3.5 Perfil Alar Adaptativo

El perfil adaptativo en cuestión opera mediante un cambio físico en la forma del ala. Un material piezoeléctrico es utilizado en la parte superior del perfil. Al ser deformado, la forma de la comba cambia. En el diseño realizado por *Munday y Jacob*^[24-26], el cual se puede observar en la Fig. 32, el actuador piezoeléctrico se encuentra instalado en el interior del cuerpo principal del perfil alar de tal manera que el extremo libre del éste se encuentre alineado con el resto del perfil cuando su radio efectivo sea el mínimo (más curvado). Una capa plástica delgada es instalada sobre el actuador para hacer que el conjunto sea más suave y posteriormente todo es envuelto en una membrana flexible, a modo de evitar uniones. Al activarse los actuadores, estos empujan sección superior y cambian físicamente la comba.

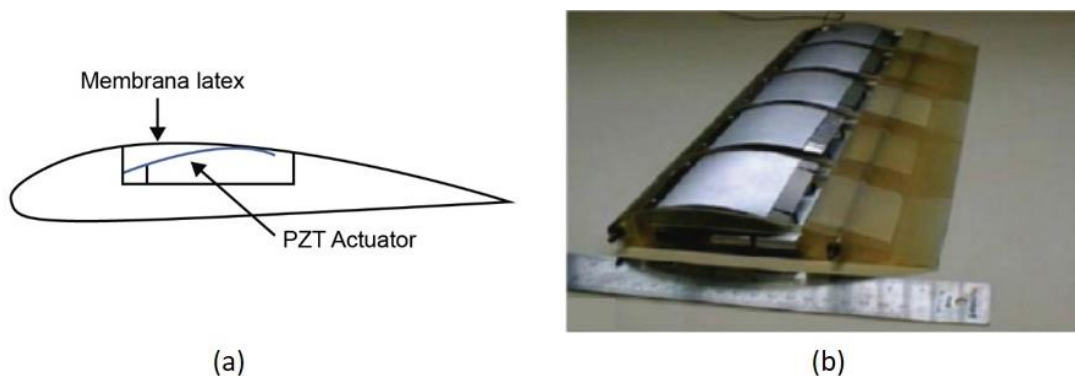


Figura 32: (a) Esquema del ala adaptativa. (b) Prototipo del ala adaptativa. (Fuente: *Pern et al. (2006)*^[27]).

El sistema está diseñado para ser extendido y retraído rápidamente. Este movimiento no sólo modifica la comba del perfil alar, además genera vórtices que fluyen sobre éste arrastrando aire con alto momentum proveniente del flujo libre, lo que pospone la separación. Esto último se encuentra ilustrado en la Fig. 33.

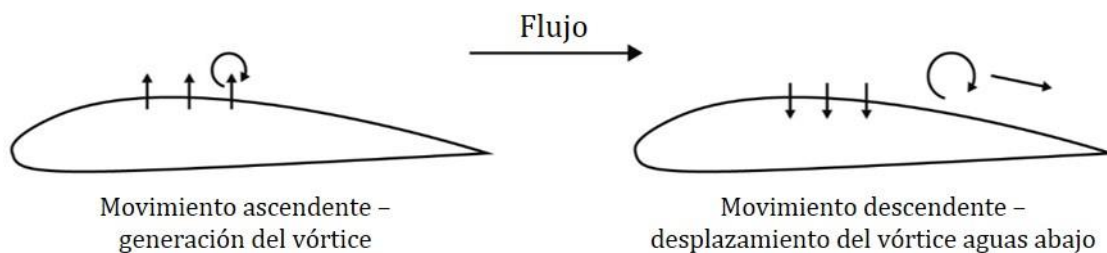


Figura 33: Esquema del funcionamiento del mecanismo de control de flujo. (Fuente: Reproducción de *Pern et al. (2006)*^[28]).

Antecedentes

En 2002, *Munday y Jacob*^[26] analizaron los efectos del cambio de forma por medio de mediciones estáticas de fuerza y utilizando velocimetría de imágenes de partículas (PIV). Se concluyó que sólo era posible conseguir mejoras modestas en la eficiencia aerodinámica L/D por medio de las posiciones estáticas de los actuadores, ya que a máximo desplazamiento del actuador se consiguió un aumento del 2% en L/D .

Pern^[27-28] demostró que al variar repetidamente la forma del perfil se lograba producir coeficientes de sustentación más altos. Esto debido a la creación de vórtices que mantienen

el flujo adherido a la superficie del perfil incluso ante presiones adversas. En estudios^[26] realizados sobre un perfil NACA 4415 equipado con el dispositivo, se utilizó visualización por hilos de humo y se observó que el espesor del flujo separado en el punto de 70% c se reducía entre un 30% a un 60% con respecto a un ala similar a al utilizar oscilaciones de la superficie de amplitud 0.002 c .

Implementación y Desafíos

Este tipo de perfil alar deformable presenta ventajas frente a otros tipos de dispositivos activos de flujo debido a que no requiere el uso de agujeros u espacio en la superficie del perfil. Por otro lado, si bien el dispositivo se desempeñó de manera excepcional en estudios computacionales y experimentales, el hecho de que el material piezoeléctrico cubre gran parte de la cuerda atenta contra la escalabilidad del dispositivo. Esto se debe a que lo anterior podría ir en perjuicio de la integridad del estructural en un aspa de tamaño real. Finalmente, es importante destacar que el uso de actuadores piezoeléctricos deformables hace necesario una fuente de alto voltaje para su alimentación.

5 PROPUESTA DE SOLUCIÓN

Como se mencionó anteriormente en el planteamiento del problema, en el presente proyecto de título se busca diseñar e implementar un sistema de control automático para un perfil alar flexible que incorpora la tecnología FishBAC (Fig. 34) como medio para que el perfil logre cambiar efectivamente su comba y, en consecuencia, su eficiencia aerodinámica.

En resumidas cuentas, el diseño FishBAC consta de tres partes principales:

- El borde de ataque, conformado por una pieza sólida y hueca a través de la cual pasa un eje al cual se enganchan tendones encargados de transmitir fuerza a la cola.
- La cola corresponde a una barra flexible delgada con costillas. Se asemeja a la espina dorsal de un pez y su forma permite que los tendones la flexionen al girar el eje.
- El manto corresponde a una lámina o mica flexible que se encarga de encapsular la cola y darle una superficie continua al perfil alar.

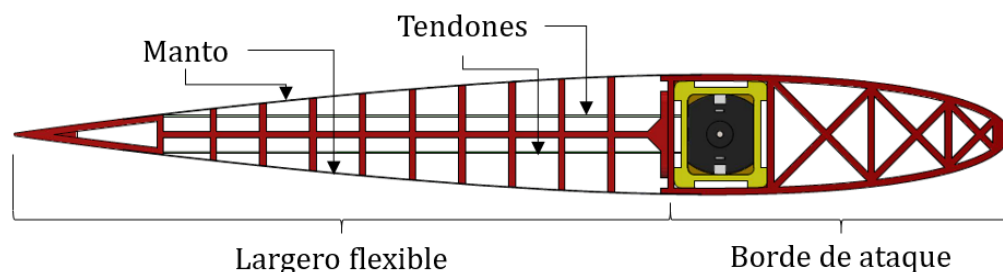


Figura 34: Diagrama descriptivo de la composición de un perfil alar FishBAC. (Fuente: Gajardo^[2]).

Barrios^[1] produjo un prototipo, sin embargo problemas en su diseño determinaron que no fuera capaz de cumplir las funciones que se requerían de él. Posterior a una inspección inicial, el equipo de trabajo determinó tres factores que debían ser corregidos a modo de que se pudiese producir un prototipo funcional:

- Las dimensiones del prototipo impedían que éste se flexionara.
- El servomotor elegido para realizar el aporte de fuerza al eje y, en consecuencia, lograr la flexión, no era capaz de aportar el torque necesario por su reducido tamaño.
- La relación de largo entre la envergadura y la cuerda (*aspect ratio*) debía ser aumentada a modo de evitar que los remolinos generados en los costados del ala afectaran mediciones realizadas al centro de ésta.

Con los puntos anteriores en mente se determinó, como se detalla en Gajardo^[2], que se mantendría una envergadura de 35 [cm] y que el largo de la cuerda sería ajustado a 18 [cm]. Ante dichas limitaciones de tamaño se hace imposible utilizar un servomotor común para aportar fuerza al eje y se propone el uso de un motor de corriente continua pequeño, el cual debe contar con un *encoder*. Esto permitirá aportar mayor torque al sistema, al mismo tiempo que con ayuda del *encoder* se puede lograr acceder a ángulos precisos de rotación por medio de programación.

En lo que se refiere al sistema de control automático, se propone la implementación de sensores de presión sobre el manto del aparato, distribuidos en dirección de la cuerda en el eje central. Esto permitirá recolectar datos de las variaciones de presión que se producen al avanzar el flujo de aire sobre el perfil y, en consecuencia, se podrá determinar dónde ocurre el desprendimiento de la capa límite de fluido. Una vez determinado si el desprendimiento está ocurriendo antes o después de lo esperado, se pueden realizar acciones correctivas accionando el motor y flexionando el perfil.

5.1 Objetivo General

Con este proyecto se busca diseñar e implementar un sistema de control electrónico que recopile y utilice información sobre el estado de flujo sobre el perfil y le permita a este ajustar su geometría a modo de mejorar los parámetros aerodinámicos que éste presenta ante distintos regímenes de flujo.

5.2 Objetivos Específicos

- Diseño e implementación de un sistema de control electrónico que permita adaptar la forma del perfil flexible ajustándose a las limitaciones de espacio y requerimientos de torque del prototipo.
- Diseño e implementación de un sistema de recolección de datos de presión que recoja información del estado del flujo de manera continua con sensibilidad y precisión adecuadas para la tarea designada.
- Integración de los sistemas de actuación y recolección de datos a la probeta flexible. Incluye la adaptación de conexiones de comunicación y alimentación.
- Realización de ensayos de funcionamiento y recopilación de datos en el túnel de viento que permitan verificar el correcto funcionamiento de los sistemas implementados y provean de parámetros relevantes para respaldar el diseño e implementación de un sistema de control automático.
- Selección e implementación de un sistema de control automático en función de los resultados obtenidos de los ensayos previamente realizados.

6 METODOLOGÍA DE TRABAJO

En la presente sección se procede a detallar las acciones que se llevarán a cabo para solucionar el problema antes descrito mediante las soluciones propuestas. En primera instancia se define una propuesta metodológica que incluye cinco pasos que deben ser cubiertos durante el trabajo. A continuación, se detallará cada uno de los pasos mencionados a manera de ilustrar el trabajo a realizar.

6.1 Propuesta Metodológica

Los cinco pasos o etapas que se realizarán en este trabajo son:

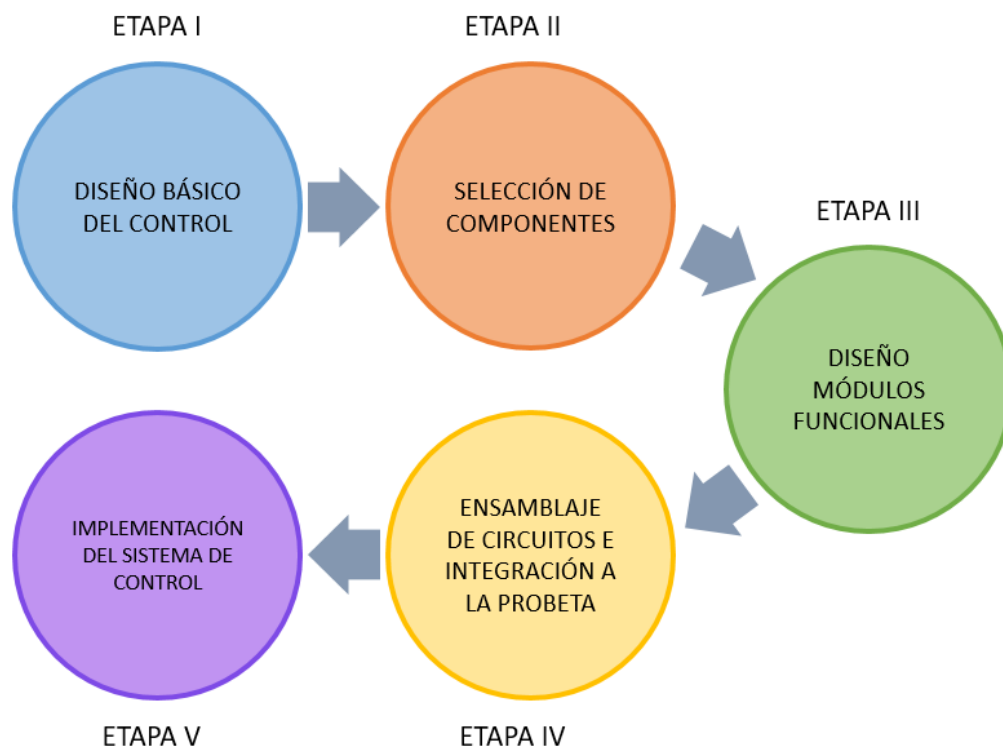


Figura 35: Etapas de desarrollo del trabajo.

6.2 Diseño Básico del Control

El sistema de control electrónico a diseñar debe cumplir tres funciones principales para realizar la tarea deseada:

- Captar información sobre el flujo de aire sobre el perfil alar.
- Procesar la información captada y generar una respuesta.
- Realizar dicha respuesta por medio de una acción sobre el sistema.

Teniendo en cuenta esto, es posible fragmentar el sistema de control en tres módulos o partes que cumplan con aquellas funciones:

- El Controlador, que se encarga de recibir y procesar la información.
- El Módulo Sensor, que se encarga de la captación de información.
- El Módulo Actuador, que se encarga de ejercer las acciones sobre el sistema.

A continuación, se presenta una descripción general de los módulos, de las partes que los componen, las funciones de dichas partes y un diagrama básico de sus interacciones. Además, se propone un posicionamiento tentativo en la probeta que será utilizada para pruebas en el túnel de viento.

6.2.1 El Controlador

El Controlador es el primer módulo a denominarse debido a que tiene la función de manipular toda la información que entra y sale del sistema. Ante las limitaciones anteriormente mencionadas para el diseño, donde se destaca el disminuido tamaño de la probeta a construir, se decide construir el sistema de control usando una placa Arduino. Esta plataforma de prototipado electrónico de código abierto está dirigida a proyectos de todo nivel de profundidad y permite utilizar el microprocesador que tiene incorporado para enviar y recibir señales previamente programadas a una variedad de distintos sensores y actuadores que pueden ser conectados a ella.



Figura 36: Arduino Uno., placa utilizada para construir el sistema de control.

Arduino se ajusta perfectamente a las necesidades del proyecto pues está dirigido a la producción de instrumentos científicos de bajo costo. Existen múltiples opciones de sensores y actuadores que se pueden ajustar a nuestras limitaciones de tamaño, que en caso de no ser los adecuados para el trabajo, pueden ser reemplazados con relativa facilidad por la gran oferta existente. Además, la plataforma es fácilmente accesible desde sistemas operativos como Linux, Mac y Windows, lo que permite que la comunicación de programas y la recolección de datos sea relativamente simple y directa.

La placa Arduino funciona de manera simple. Una vez es conectado a la alimentación, la placa ejecutará el último programa cargado en ella. Este programa puede ser reiniciado manualmente por medio de un botón (el cual se puede observar en la Fig. 36, en la esquina superior izquierda). La alimentación puede ser entregada de dos maneras: por medio de la conexión a un computador vía un cable USB tipo A/B (comúnmente conocido como cable de impresora) o por medio de un adaptador de corriente específico. La conexión al puerto USB permite la comunicación de información en ambas direcciones, haciendo posible cargar programas a la placa y obtener información enviada de manera serial según se detalle en la

programación. Esto último se hace de gran utilidad a la hora de recopilar datos directamente al computador.

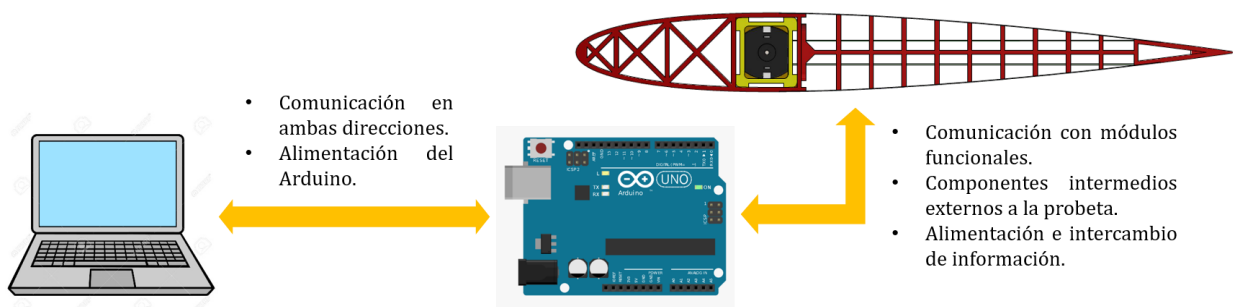


Figura 37: Diagrama de interacciones del controlador.

El Controlador estará ubicado al exterior de la probeta. Esto se debe a que, a pesar de su disminuido tamaño, sigue siendo muy grande para ajustarse de manera efectiva a ésta. Además, esto facilitará su conexión con el resto de los componentes de los otros módulos y con el computador, como se ilustra en la Fig. 37.

6.2.2 Módulo Sensor

Como se indicó al inicio de la sección, el Módulo Sensor es el conjunto de componentes electrónicos que se encargan de la recopilación de información. Específicamente, está compuesto por sensores de presión que miden un valor y lo transforman en una señal que puede ser análoga, digital o serial. Dependiendo del tipo de alimentación y comunicación que requieran dichos sensores, estos necesitarán de componentes intermedios para interactuar con el Controlador.

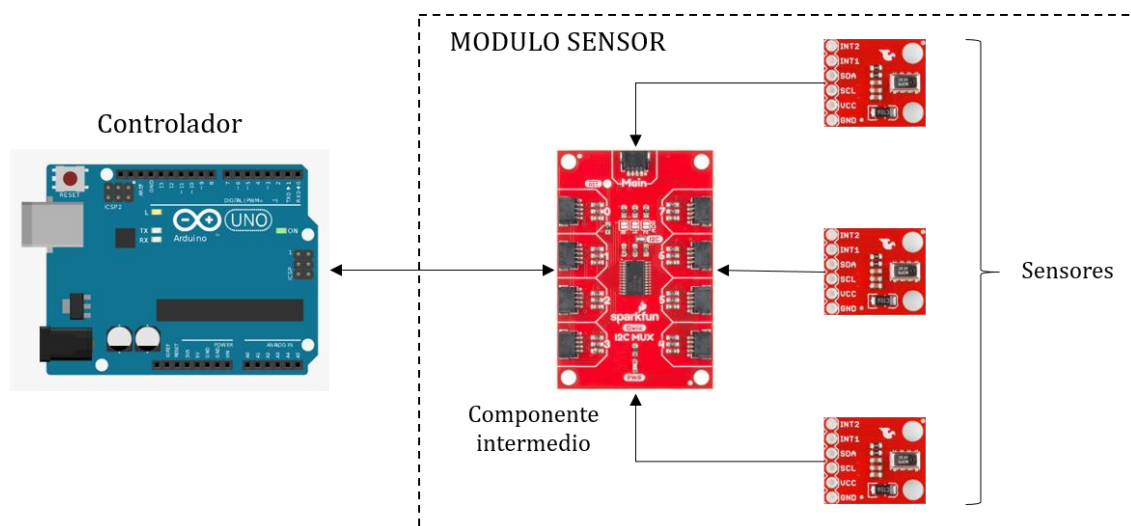


Figura 38: Diagrama de interacciones de módulo sensor.

Como se observa en el diagrama de la Fig. 38, el o los componentes intermedios recibirán la información de los múltiples sensores y facilitarán su llegada al Controlador. Debido a que se cuenta con limitado espacio en la probeta, dichos componentes serán ubicados en el exterior al igual que el controlador. La Fig. 39 muestra la distribución tentativa de los componentes del circuito que conforma el módulo sensor, donde básicamente se distribuyen

los sensores sobre el manto del prototipo y, por medio de cables, estos se conectan al resto del circuito que se encuentra en el exterior. Se busca conseguir implementar la mayor cantidad posible de sensores sobre la probeta.

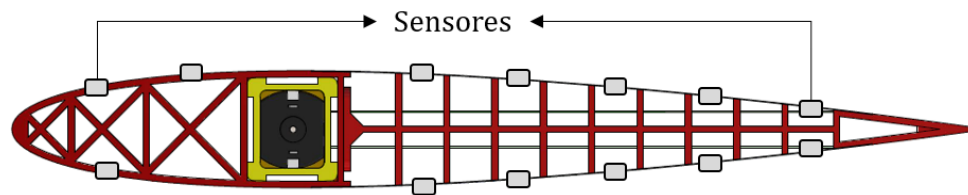


Figura 39: Diagrama de posicionamiento tentativo de los sensores. Se planea instalar la mayor cantidad posible de sensores tanto en el manto inferior como el superior.

6.2.3 Módulo Actuador

El Módulo Actuador es el conjunto de componentes encargado de realizar trabajo sobre las partes físicas de la probeta para conseguir un cambio en la curvatura de ésta. En una iteración del proyecto esta función era realizada por un servomotor, pero debido a la limitación de tamaño éste no otorgaba el torque suficiente para lograr la flectar efectivamente la probeta y, en consecuencia, se decide reemplazarlo por un conjunto de componentes que cumplan la misma función.

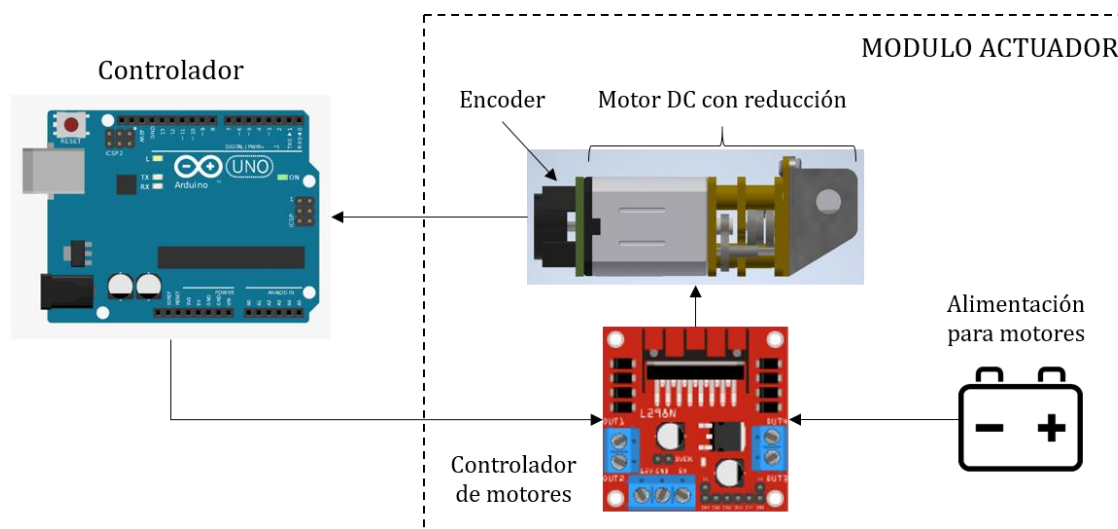


Figura 40: Diagrama de interacciones del módulo actuador.

Como se observa en la Fig. 40, se desea reemplazar el servomotor por un motor de corriente continua. Éste debe poseer una caja de reducción a modo de permitir aportar un alto torque al sistema sin la necesidad de ocupar demasiado espacio. Sin embargo, los motores DC no cuentan con los instrumentos que le permiten moverse en direcciones opuestas ni con los que permiten determinar el cambio de posición de su eje. Es por esto que el módulo también debe integrar un *encoder* rotacional, componente que permitirá monitorear el movimiento del eje del motor. Además, será necesario agregar un controlador de motores o puente H al conjunto, componente que tiene por función el invertir la dirección de la corriente en un circuito y permitirá que el motor gire en ambas direcciones y servirá como punto de alimentación directa para el motor, asegurando que el alto voltaje de éste no afecte el controlador. A grandes rasgos, el programa constará de un controlador PID para controlar el

motor en conjunto con sus componentes, logrando que éste se mueva a posiciones precisas previamente determinadas.

6.3 Selección de Componentes

Habiendo realizado un diseño conceptual básico de los módulos funcionales del sistema a construir, se procede a seleccionar los componentes que integrarán dichos módulos. Se busca que estos puedan atenerse a las limitaciones de tamaño y al menor precio posible. Cabe mencionarse que esta selección puede verse modificada por situaciones que surjan durante el proceso de implementación del sistema.

6.3.1 Selección del Controlador

Como se mencionó en la sección anterior, se decide utilizar la plataforma Arduino como controlador del sistema. Existen múltiples modelos de Arduino que responden a distintos tipos de prestaciones, aunque en general mantienen similares aptitudes a la hora de ser utilizados en proyectos. Existen modelos de reducido tamaño como Arduino Micro o Arduino Nano, como también existen modelos de mayor tamaño que aceptan más conexiones y presentan capacidades de procesamiento aumentadas, como son el caso de Arduino Mega. En particular se opta por utilizar una placa Arduino Uno R3 (Fig. 36), el cual corresponde al modelo estándar, que presenta una buena cantidad de puertos para conectar componentes y acceso común vía computador.

6.3.2 Selección de Componentes del Módulo Actuador

El módulo actuador está compuesto por tres componentes electrónicos, los cuales serán tratados a continuación.

6.3.2.1 Motor DC

Los motores de corriente continua vienen en múltiples tamaños y formas. Dependiendo de su potencia, necesitarán de un mayor voltaje para funcionar a su velocidad nominal y, en caso de poseer una reducción, podrán aportar mayor torque al sistema al sacrificar parte de esa velocidad de giro.

Debido al común funcionamiento de todos los motores eléctricos de corriente continua, se opta por buscar en el mercado local por la opción de menor tamaño. En la Fig. 41 se observa el motor con reducción más pequeño que se encuentra disponible. No se ahondará en sus características técnicas debido al siguiente componente a seleccionar.



Figura 41: Motor DC con reducción 30:1.

6.3.2.2 Encoder

Para que un *encoder* rotacional pueda registrar el movimiento de un eje es necesario que dicho componente se encuentre acoplado a éste. Es por esto que es posible encontrar motores de corriente continua que poseen un *encoder* incorporado, razón por la que en el punto anterior se obvió las consideraciones técnicas.



Figura 42: Motor DC con reducción 30:1. Posee un encoder rotacional incorporado y una conexión común para todas las entradas y salidas eléctricas.

Existe en el mercado local una versión del mismo motor antes mencionado que cuenta con un *encoder* rotacional incorporado, el cual se puede observar en la Fig. 42 y cuyas características técnicas relevantes han sido resumidas en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones técnicas del motor. (Fuente: <https://bit.ly/38fq7vu>).

Voltaje nominal	6 [V]
Relación de reducción	30:1
Dimensiones	27×10×12 [mm]
Velocidad del motor	15000 [rpm]
Velocidad sin carga (con reducción)	530 [rpm] a 6 [V]
Par nominal	0.2 [kg×cm]
Velocidad nominal	300 [rpm] a 6 [V]
Torque instantáneo	0.45 [kg×cm]

En un punto inicial, se selecciona este motor para su uso en el diseño del módulo actuador y pruebas de funcionamiento del código de éste. Al desconocerse la potencia necesaria a ejercer por el actuador sobre la probeta, es posible que en el futuro deba ser reemplazado por un motor con mayor reducción y/o mayor voltaje de alimentación dependiendo de la materialidad del perfil alar en el que será montado. Si bien, éste es el único motor de su tipo disponible en el mercado local, existen productores internacionales que importan motores de mayor voltaje y torque, pero que mantienen las mismas dimensiones.

6.3.2.3 Controlador de Motores

El controlador de motores o puente H es el componente que se encarga tanto de alimentar los motores como de dirigir la corriente de modo que éste pueda realizar giros del eje en ambos sentidos. Existen múltiples módulos controladores en el mercado local que pueden satisfacer nuestra necesidad, los cuales varían en su complejidad y en la cantidad de motores que pueden ser conectados a ellos. Se decide hacer uso de un módulo L298N (Fig. 43), el cual tiene la capacidad de controlar dos motores a la vez y acepta dos entradas de voltaje, 5 [V] y 16 [V], lo que facilitará el reemplazo de los motores de ser necesario.

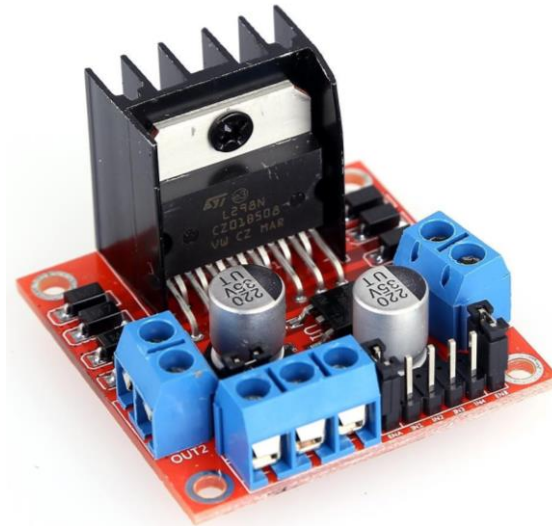


Figura 43: Módulo controlador de motores L298N.

Cabe mencionar que la alimentación de los motores se hace desde el puente H y no desde la placa Arduino debido a que esto permite usar voltajes más elevados y funciona como medio de seguridad, impidiendo que exista un reflujó de energía desde los motores a la placa.

6.3.3 Selección Componentes del Módulo Sensor

A diferencia de los componentes del módulo actuador, los que integran el módulo sensor acarrearán una complejidad mayor debido a que deben ser capaces de captar un cambio físico en su entorno y transducirlo en una señal eléctrica que debe ser interpretada por el controlador. El tipo de sensor será seleccionado en función de las limitaciones antes presentadas y la función que debe cumplir, mientras que los componentes intermedios, de ser necesarios, se elegirán en función de los sensores.

6.3.3.1 Sensor de Presión

Al buscar opciones de sensores de presión para Arduino en el mercado local se concluyó que no eran importados y que sería necesario comprar a productores internacionales. Al investigar las opciones que se ajustaban a las limitaciones, no fue posible encontrar sensores de presión dinámica pero sí se observó la presencia de múltiples de estos que son usados para monitoreo de condiciones ambientales que incluían sensores de presión atmosférica.

Luego de investigar en foros sobre el uso de esos sensores se decidió limitar las opciones al productor de insumos electrónicos *Sparkfun*. Se busca que estos cumplan con los siguientes criterios:

- Deben ser una placa o módulo *breakout*, pues no se cuenta con los conocimientos técnicos suficientes para habilitar un sensor para su uso desde su construcción.
- El sensor debe ubicarse sobre el nivel de los demás componentes de la placa, pues se pretende contar con la menor cantidad de interferencia posible con el flujo.
- El sensor debe ser capaz de captar presiones menores a la atmosférica, pues se pretende evaluar el gradiente de presión del flujo sobre el perfil alar.

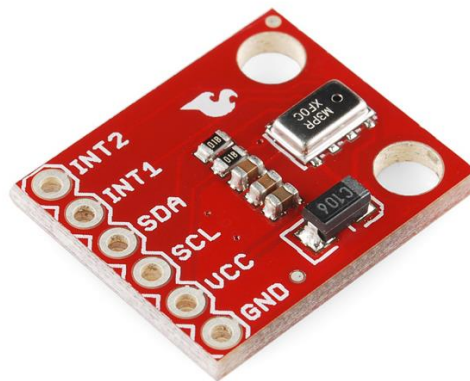


Figura 44: Sensor de presión breakout MPL3115A2 de SparkFun.

Teniendo éstas limitaciones en cuenta, se compararon los sensores que cumplían con ellas y se seleccionó el sensor *breakout* MPL3115A2 (Fig. 44). Dicha decisión se basó en que ése modelo contaba con una resolución mayor que los otros sensores con los que fue comparado, además de tener un tamaño muy reducido. Las especificaciones técnicas relevantes del sensor se encuentran resumidas en la Tabla 2, a continuación:

Tabla 3: Especificaciones técnicas del sensor MPL3115A2.

Rango de Medición	50-110 [kPa]
Error nominal	± 0.4 [kPa]
Resolución	0.25 [Pa]
Alimentación	3.3 [V]
Dimensiones	16×18 [mm]

La placa sensor seleccionada utiliza el protocolo de comunicación I²C para enviar y recibir información. Esto significa que el sensor cuenta con una dirección y el controlador solicita la información por medio de ésta. Debido a que este tipo de sensores se producen en masa, en general todos poseen la misma dirección por default y no es posible pedir que esa dirección sea cambiada a menos que se encarguen al por mayor al fabricante del sensor. Este problema puede ser solucionado utilizando un componente intermedio llamado multiplexor, el cual será explicado a continuación.

6.3.3.2 Multiplexor

Un multiplexor es un componente electrónico que permite recibir varias entradas y que posee sólo una salida. Es capaz de habilitar los canales de las entradas según se lo indique un controlador, a modo de sólo sacar una de las señales por la salida.

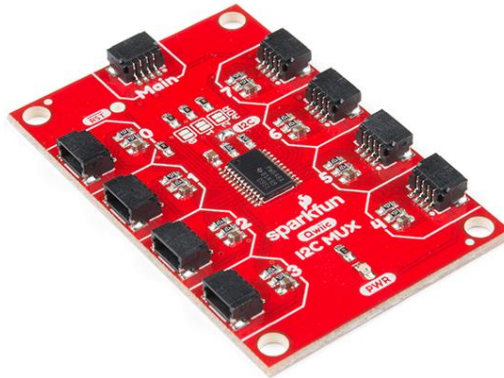


Figura 45: SparkFun Qwiic Mux Breakout (TCA9548A) de 8 canales.

El problema expuesto en el punto anterior puede ser enfrentado haciendo uso de un multiplexor I²C a cuyas entradas se conectarán los sensores de presión y la salida irá directo al controlador. Se seleccionó el mux que se observa en la Fig. 45 porque tiene un rango de voltaje de trabajo en el que se encuentra el voltaje de alimentación de los sensores. Además, la línea Qwiic de Sparkfun facilita la conexión de componentes por medio de conectores simples que no necesitan hacer uso de pins ni de ser soldados, muy útiles a la hora de modificar las conexiones para realizar cambios o transportar el sistema.

6.3.3.3 Shield

Un *shield* es un componente que se acopla a un controlador a modo de facilitar la conexión de otros componentes o para habilitar nuevos puntos de conexión a éste. En el punto anterior se decidió hacer uso de un multiplexor que usa conexiones específicas de la línea Qwiic de la marca Sparkfun. Es por lo anterior, que se decide agregar a nuestro controlador un *shield* (Fig. 46) que le permite mantener las mismas entradas y salidas que posee, pero que además agrega cuatro puertos I²C de 3.3 [V] que permitirán un fácil acceso del multiplexor a la comunicación y alimentación.

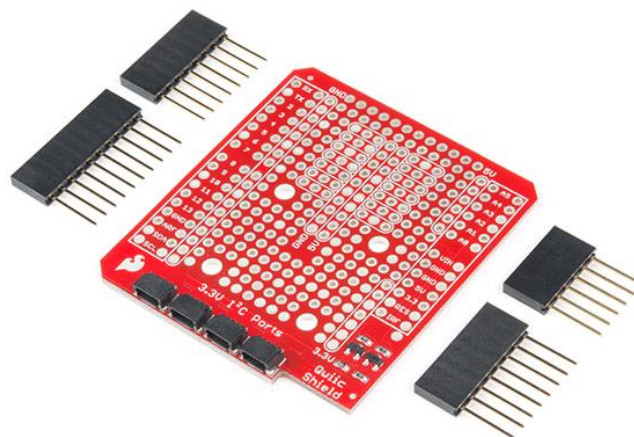


Figura 46: SparkFun Qwiic Shield para Arduino Uno.

Cabe mencionar, que este *shield* aporta un área de prototipado extra que facilita la creación de circuitos integrados sobre él y que puedan ser necesarios en el futuro.

6.4 Diseño de Módulos Funcionales

Habiendo seleccionado los componentes a utilizar y teniendo un modelo conceptual de los circuitos a construir, se procede a hacer un diseño específico para cada circuito de los módulos funcionales. A continuación, se adjunta el diagrama de circuito para cada módulo, los cuales serán armados y probados por separado, y posteriormente integrados a la probeta. Además, se adjuntan notas sobre el cableado y la alimentación.

6.4.1 Circuito Módulo Actuador

La Fig. 47, a continuación, muestra el circuito que conforma el módulo actuador y sus conexiones con el controlador principal.

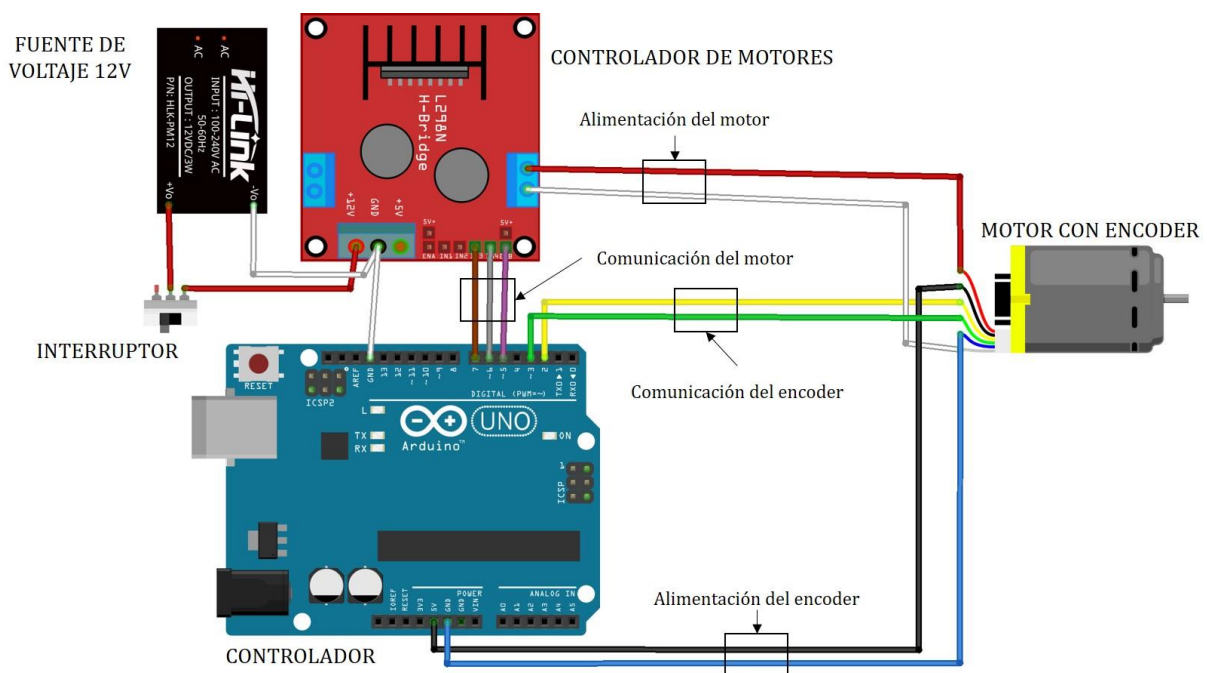


Figura 47: Diagrama de circuito del módulo actuador.

Algunas notas de cableado relevantes son:

- Para la comunicación entre el Arduino y el controlador de motores, se conectan los pines digitales 5, 6 y 7 a los pines ENA, IN1 e IN2 (o su equivalente si se utiliza la otra salida de motores). Es importante que el pin de habilitación (ENA) se conecte a un pin digital PWM para que éste pueda regular la potencia de salida del motor.
- Los cables de comunicación del *encoder* se conectan a los pines digitales 2 y 3 debido a que estos poseen la capacidad de funcionar como *interrupt*, o que prioriza su lectura sobre otras rutinas en el código.
- La alimentación del *encoder* se obtiene desde el controlador principal para no arriesgar que reciba voltaje demasiado alto desde el controlador de motores.
- La fuente de voltaje que alimenta el controlador de motores debe ajustarse a los requerimientos del motor.

6.4.2 Circuito Módulo Sensor

La Fig. 48 ilustra las conexiones del módulo sensor. El circuito real se ve simplificado gracias al diseño del multiplexor seleccionado que utiliza cables con conexiones especiales que facilitan la alimentación. La figura sólo muestra las conexiones de tres sensores a modo de ejemplo.

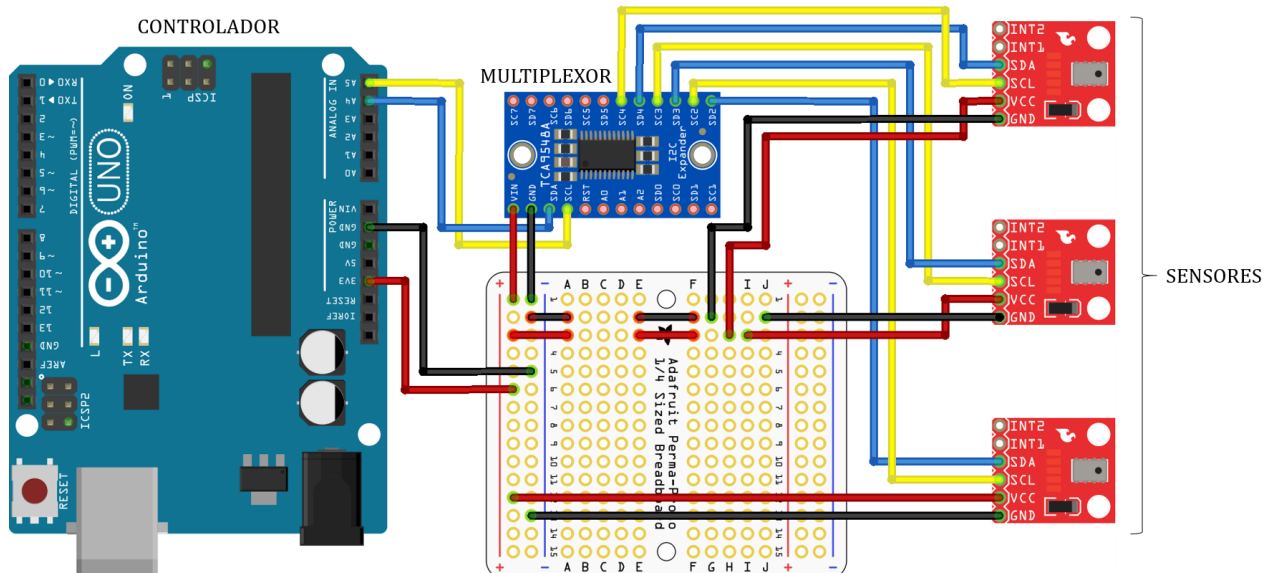


Figura 48: Diagrama de circuito del módulo sensor.

El circuito real no cuenta con una tabla de prototipado, que en este caso se utilizó para facilitar la visualización de los cables de alimentación. La conexión al arduino también se ve simplificada gracias a la integración de un *shield*.

6.5 Ensamblaje de Circuitos e Integración a la Probeta

La cuarta etapa metodológica para el desarrollo del proyecto comprende el ensamblaje de los circuitos previamente diseñados y su posterior integración a la probeta. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir y los alcances de cada punto.

6.5.1 Ensamblaje de Módulos Funcionales

El primer paso corresponde al ensamblaje de los módulos para su programación preliminar por separado y el ajuste de su funcionamiento antes de ser integrados a la probeta que será ubicada en el túnel de viento. El desarrollo de éste comprende el siguiente procedimiento:

1. Habilitación de componentes electrónicos que lo necesiten. Por ejemplo, soldadura de los *pins* a los sensores o la adaptación de cables de comunicación y alimentación.
2. Armado de los circuitos según diseño previo.
3. Codificación y pruebas de funcionamiento preliminar. Se busca que los módulos sean capaces de lograr las funciones para las que fueron diseñados, por lo que al integrarlos a la probeta el código tendrá que ser modificado para hacer ajustes.

6.5.2 Integración a la Probeta

El segundo paso corresponde a la adaptación de los módulos al conjunto que compone la probeta del perfil alar. El procedimiento para ello se reduce a:

1. Anclaje de los componentes a sus posiciones definitivas en la probeta. Esto incluye sólo a los componentes que forman parte del prototipo y no a los periféricos.
2. Adaptación de las conexiones de alimentación y comunicación para que posean el largo suficiente para realizar su función, en especial los cables de los sensores y del motor que deben ser lo suficientemente largos para salir del túnel de viento y llegar al controlador.
3. Pruebas de funcionamiento preliminar. Se busca comprobar que las conexiones son estables y que los módulos pueden realizar las funciones antes programadas.

6.5.3 Recopilación de Datos en Funcionamiento

El último paso de esta sección se refiere al procedimiento que se utilizará para probar el funcionamiento de los sensores y del actuador en el túnel de viento. Esto se realizará por medio de dos pruebas en las que se recopilará datos adquiridos por los sensores de presión sobre la probeta.

La primera prueba apunta a visualizar si los sensores son capaces de captar variaciones de presión sobre el manto del perfil alar al variar la curvatura de éste o el ángulo de ataque. Este ensayo es de carácter cualitativo y permitirá determinar si los sensores perciben los cambios en el gradiente de presión y si la recopilación de datos puede ser realizada por un periodo extendido de tiempo. El experimento se realizará con velocidades de flujo de 10 [m/s] y 20 [m/s], con el perfil sin flectarse y completamente flectado para cada velocidad, y se realizarán cambios de ángulo de ataque en intervalos de tiempo similares.

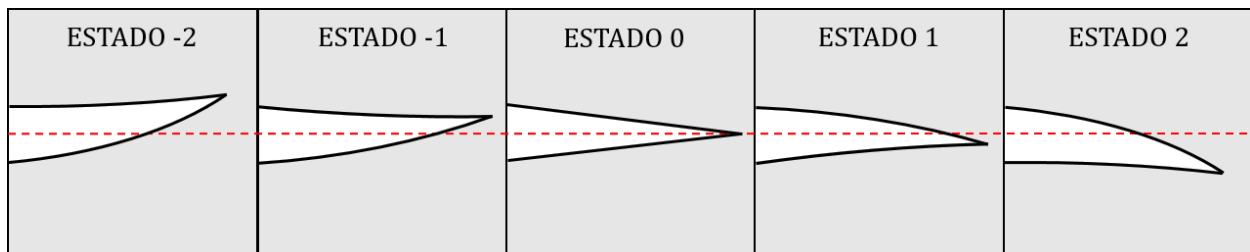


Figura 49: Esquema de los estados de flexión de la probeta para el segundo ensayo.

El segundo ensayo se realizará para velocidades de flujo de 5, 8 y 16 [m/s]. En éste se medirá la presión sobre el manto para cinco posiciones de flexión del perfil (Fig. 49) a ángulos de ataque de 0°, 4°, 8°, 12°, 16° y 20°. Para cada caso se recopilará información sobre el tiempo de partida para cada posición de flexión y los valores de sustentación y arrastre indicados en el túnel de viento de manera análoga. La presión será registrada automáticamente por medio del sistema. En la Tabla 4 se ejemplifica cómo se recolectarán los datos de tiempo, arrastre y sustentación.

Tabla 4: Ilustra el método de medición y recolección de datos para sustentación y arrastre.

Velocidad [m/s]	Ángulo de ataque [°]	Posición de Flexión [-]	Tiempo de inicio [s]	Sustentación [kg]	Arrastre [kg]
V_1	α_1	-2	T_1	L_1	D_1
		-1	T_2	L_2	D_2
		0	T_3	L_3	D_3
		1	T_4	L_4	D_4
		2	T_5	L_5	D_5
	α_2	-2	T_1	L_6	D_6
		-1	T_2	L_7	D_7
		0	T_3	L_8	D_8
		1	T_4	L_9	D_9
		2	T_5	L_{10}	D_{10}

El objetivo de la segunda prueba es obtener información de las mediciones de presión de manera estandarizada para evaluar la posibilidad de usar el sistema creado como base para la implementación de un sistema de control. Esto significa corroborar la consistencia de las mediciones y comparar las variaciones de presión registradas con otras fuentes como simulaciones para validar su precisión.

6.6 Implementación del Sistema de Control

La implementación del sistema de control automático es la última etapa metodológica a desarrollar luego de diseñar y comprobar el funcionamiento básico de la probeta y sus módulos funcionales. Esta quinta etapa consta del diseño conceptual del sistema de control, de su implementación y de los procesos de calibración necesarios para conseguir el funcionamiento deseado. A continuación, se presenta una descripción del procedimiento que se realizará para la implementación del sistema de control.

6.6.1 Selección del Método de Diseño de Control Automático

Para diseñar el sistema de control de nuestro aparato, se indagó en métodos de diseño de sistema de control utilizados comúnmente para la regulación de procesos. La selección e implementación de un método de control es de carácter iterativo, y generalmente consta de los siguientes pasos principales:

1. La identificación de las variables de control.
2. El modelado del proceso.
3. Diseño del sistema de control.
4. Selección de tecnología e implementación.
5. Pruebas y calibración.

En particular, nuestra metodología ha cubierto los puntos 1 y 4 al continuar con un trabajo limitado a especificaciones anteriores de tamaño.

El modelado del proceso puede afrontarse de múltiples puntos. Se puede considerar modelar matemáticamente el sistema completo, considerando cada elemento del sistema electrónico

y su influencia en el prototipo. También es posible simplificar el proceso y sólo considerar las lecturas de sensores y actuación del motor. Incluso, es posible actuar bajo el uso de una base de datos previamente simulados o recolectados y producir un método de control basado en estados conocidos de funcionamiento.

Por su parte, el diseño específico del sistema de control, su prueba y calibración, son procesos que sólo es posible realizar al contar con un sistema implementado y contar con datos empíricos del funcionamiento de éste.

6.6.2 Diseño Conceptual del Control Automático

Si bien no es posible realizar un completo diseño del sistema de control automático, en la presente sección se proponen dos métodos de control tentativos para su futura implementación en el perfil flexible sensorizado.

6.6.2.1 Control en base a estados

Uno de los métodos más simples e independientes de funcionamiento que se pueden implementar consta de la construcción de una base de datos de presión sobre el perfil al enfrentarse a distintas condiciones de flujo. Esta base de datos puede ser construida por medio de mediciones reales del sistema o por medio de la simulación de las condiciones utilizando un modelo computacional.

Ventajas del método

- Simple de implementar por código al sistema.
- Idealmente siempre existirá una posición que se ajuste al régimen de flujo.

Desventajas del método

- Dependiendo de la cantidad de estados pre-programados, el sistema puede presentar una respuesta lenta ante el cambio de las condiciones.
- Al manejar sólo datos de presión sobre el manto, la selección de un nuevo estado al cual pasar se hace arbitraria, pues requiere de conocimientos de otras variables como son el ángulo de ataque o la velocidad del flujo.
- Requiere una inversión de tiempo para construir las bases de datos, ya sean por medio de mediciones con la probeta o por simulación.

6.6.2.2 Control en función del comportamiento de una variable

Un método de control más sofisticado que el anterior, consiste en la regulación en función de una variable. Se busca modelar el comportamiento del actuador en función de los datos registrados. En nuestro caso particular, los registros de presión se encuentran distribuidos sobre todo el ala y, por sí solos, cada sensor no aporta información relevante. Sin embargo, al procesar los datos recopilados, es posible estimar variables como la zona de desprendimiento del flujo y utilizar dicho valor para asociarlo al estado de flexión del perfil.

A modo de simplificar el proceso del modelamiento completo del proceso, se busca asociar el movimiento del motor con una variable aerodinámica promediada que describa el estado de flujo. De esta maneja, el movimiento del motor no sólo no dependerá de su posición, sino

que también se le aplicará potencia a medida que se alcanza un valor óptimo de la variable en cuestión.

Ventajas del método

- Sigue siendo relativamente simple de implementar. Por medio de un controlador PID es posible ajustar la potencia del motor al cambio de un coeficiente calculable del flujo.
- Requiere un mínimo modelado del sistema, lo que reduce el tiempo de trabajo y los conocimientos requeridos para su implementación.
- El sistema tendría la capacidad para reaccionar en tiempo real a las variaciones de presión sobre el manto.
- Se cuenta con métodos empíricos como el de Ziegler-Nichols para calibrar el modelo de funcionamiento.

Desventajas del método

- Es altamente dependiente en la calidad de la medición de los sensores y de su consistencia.
- La variable de control debe ser seleccionada de manera apropiada y, en ocasiones, puede requerirse de información adicional a las mediciones de presión sobre el manto.
- La respuesta en tiempo real debe estar bien calibrada para evitar generar más perturbaciones que las que se evitan al integrar el sistema de control al perfil.

7 DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN

Habiendo descrito la metodología utilizada para este trabajo, se continua con la descripción del proceso práctico mediante el cual se desarrollaron los módulos funcionales. Este proceso comprende el ensamblaje de los circuitos previamente diseñado, su programación modular y las pruebas de funcionamiento por separado. Posteriormente, los módulos son integrados a la probeta y se realizan experimentos a modo de determinar si su funcionamiento es adecuado para realizar la tarea que se busca que cumplan. Cabe destacar que el proceso es de carácter iterativo, por lo que los circuitos fueron ajustados para mejorar la manera en la que cumplen su función, ya sea por cambio de componentes o ajustes espaciales para facilitar o mejorar su conexión.

7.1 Ensamblaje y Prueba de Módulos Funcionales

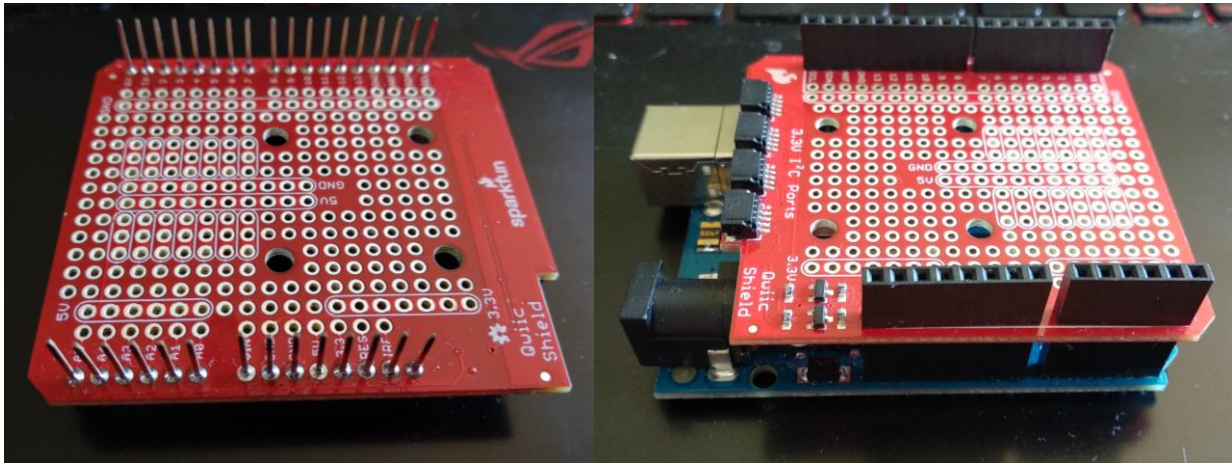
Todos los módulos funcionales requieren en cierta medida de un ensamblaje o preparación de sus componentes para funcionar. En general, el ensamblaje corresponde a la conexión de cables o *jumpers* entre los componentes. Por otro lado, en ocasiones es necesario habilitar componentes agregando partes que permitan realizar las conexiones antes mencionadas.

7.1.1 Ensamblaje del Controlador

Como se mencionó anteriormente en el diseño de los módulos funcionales, el módulo controlador está conformado solamente por la placa Arduino Uno R3. Sin embargo, debido a que uno de los componentes del módulo sensor se encuentra acoplado directamente al Arduino, se detallará su habilitación y conexión al controlador. Además, se describe el método de alimentación y comunicación utilizado por el controlador.

7.1.1.1 Habilitación del shield I²C y acoplamiento al controlador

El *shield* seleccionado en el punto 6.3.3.3 es adquirido como se observa en la Fig. 50, por lo que para ser utilizado es necesario soldar los *pins* que vienen incluidos de manera que coincidan con todos los *pins* del Arduino. El *shield* está diseñado específicamente para ser utilizado en conjunto con Arduino Uno, por lo que simplemente soldando cada pin en su lugar estos coincidirán. El resultado de la soldadura puede ser observado en la Fig. 50 (a) mientras que en la Fig. 50 (b) se puede observar cómo se acopla el *shield* al controlador.



(a)

(b)

Figura 50: (a) Pins soldados en el shield, vista inferior. (b) Shield instalado sobre la placa Arduino.

Esta configuración permite que el controlador conserve acceso a todos sus pines, mientras que el *shield* puede alimentar sus puertos I²C con un voltaje de 3.3 [V] aportado directamente por el Arduino. La Fig. 51 muestra los pines más relevantes a los que da acceso el shield I²C, los cuales son explicados de manera resumida en la Tabla 5.

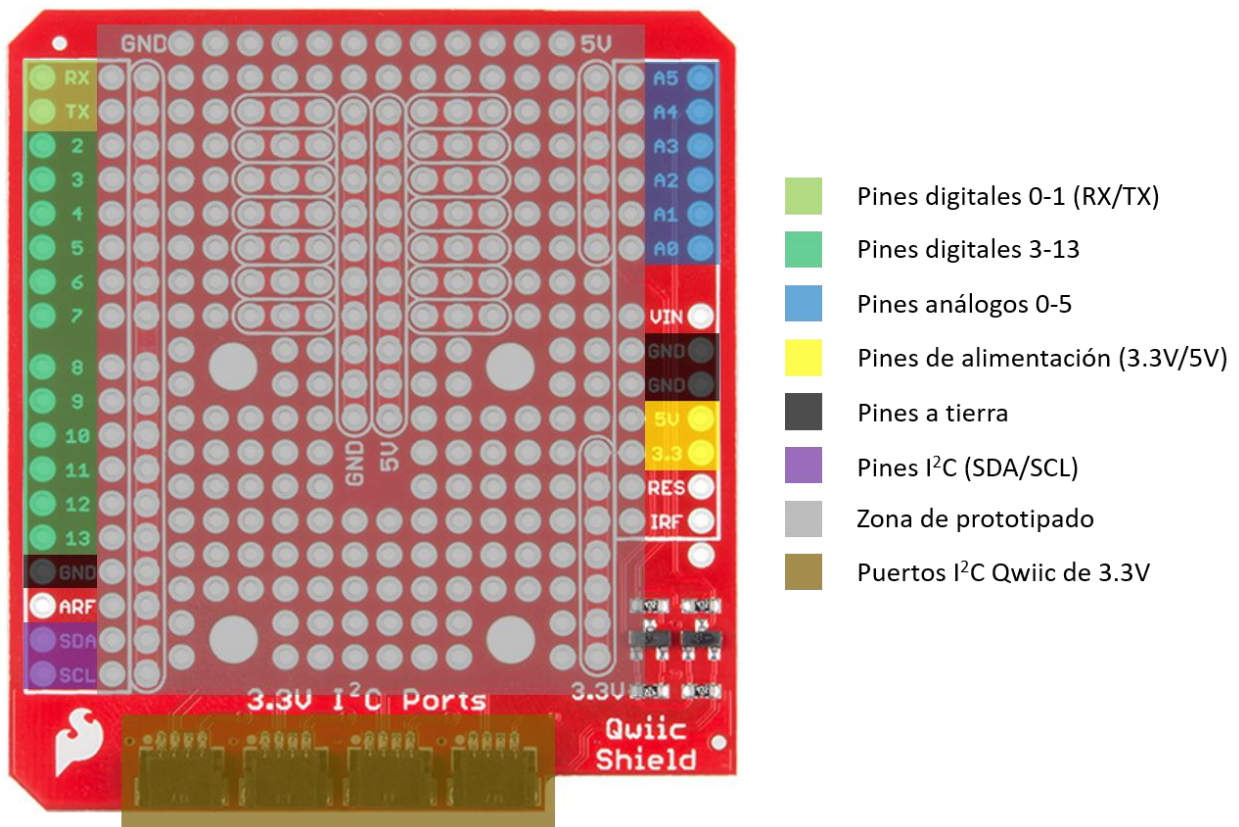


Figura 51: Diagrama de conexiones (pinout) del shield I²C. Los pines destacados coinciden con las entradas y salidas del controlador Arduino, mientras que el shield agrega una zona de prototipado y puertos I²C con conectores Qwiic de 3.3V.

Tabla 5: Descripción de los pines relevantes del controlador.

Tipo	Descripción	Pines relevantes	Uso específico
Pines Digitales	Comunican información por medio de pulsos altos (5V) y bajos (0V).	0 y 1 (RX/TX)	Pines de comunicación serial. Pueden ser utilizados como pines digitales siempre que no exista comunicación vía USB debido a que replican la información enviada.
		2 y 3	Pines de interrupción (<i>interrupts</i>). Permiten priorizar una acción por sobre el orden regular de la programación al detectar una fluctuación en el valor de una función ISR (<i>Interrupt Service Routine</i>).
		3,5,6,9,10 y 11	Pines PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>). Permiten crear una señal cuadrada de 8 bits para alimentar un dispositivo según el ciclo de trabajo que se requiera.
Pines Análogos	Comunican información por medio de voltajes de 0V a 5V.	A4 y A5	Pines I ² C. Permiten comunicación por protocolo I ² C. A4 corresponde al pin SDA (<i>Serial Data Line</i>), que se encarga de transmitir el bus de información, y A5 corresponde al pin SCL (<i>Serial Clock Line</i>), que suministra una señal reloj que sincroniza los dispositivos conectados.
Pines I²C	Alternativas de los pines A4 y A5.	SDA y SCL	Permiten comunicación por protocolo I ² C. Se encuentran conectados a los pines A4 y A5, por lo que no pueden ser usados para una función diferente. Comunican información como un pin análogo.

7.1.1.2 Conexiones de alimentación y comunicación del controlador

Como fue mencionado anteriormente, el controlador puede ser alimentado directamente por medio de un adaptador de corriente o por medio de un cable USB tipo A/B (Fig. 52). En particular, se utilizó la conexión por medio de USB ya que permitía la comunicación serial de información con el computador, habilitando la lectura y/o recopilación de datos registrados por los sensores y el controlador.

**Figura 52:** Cable USB tipo A/B.

Se utilizaron dos cables durante el proceso, uno de alrededor de 50 [cm] y otro cercano a 150 [cm]. El primero fue utilizado principalmente durante las etapas de armado y habilitación de los módulos funcionales, mientras que el segundo se utilizó a la hora de realizar pruebas en el túnel de viento. Cabe mencionar que para obtener información por el puerto serial, es necesario habilitar la comunicación serial con el computador por medio de programación.

7.1.2 Ensamblaje y Habilitación del Módulo Actuador

El módulo actuador fue el primero en ser ensamblado según el diseño de circuito que se encuentra en el punto 6.4.1 (Fig. 47). Este circuito fue montado en primera instancia conectando los componentes directamente al controlador por medio de *jumpers* y la programación fue probada con el motor sin carga sobre él. A continuación, se describen en detalle la habilitación de componentes, conexiones realizadas y ajustes posteriores que se realizaron al iterar en la creación del módulo actuador definitivo.

7.1.2.1 Conexiones de los componentes del módulo actuador

En primera instancia, es importante identificar las entradas y salidas de los componentes electrónicos que conforman el módulo actuador. El controlador de motores L298N es el encargado de dirigir los movimientos del motor según se lo indique el controlador principal y de alimentarlo con el voltaje necesario. La Fig. 53 muestra el diagrama de entradas y salidas del puente H, las cuales son explicadas a continuación en la Tabla 6.

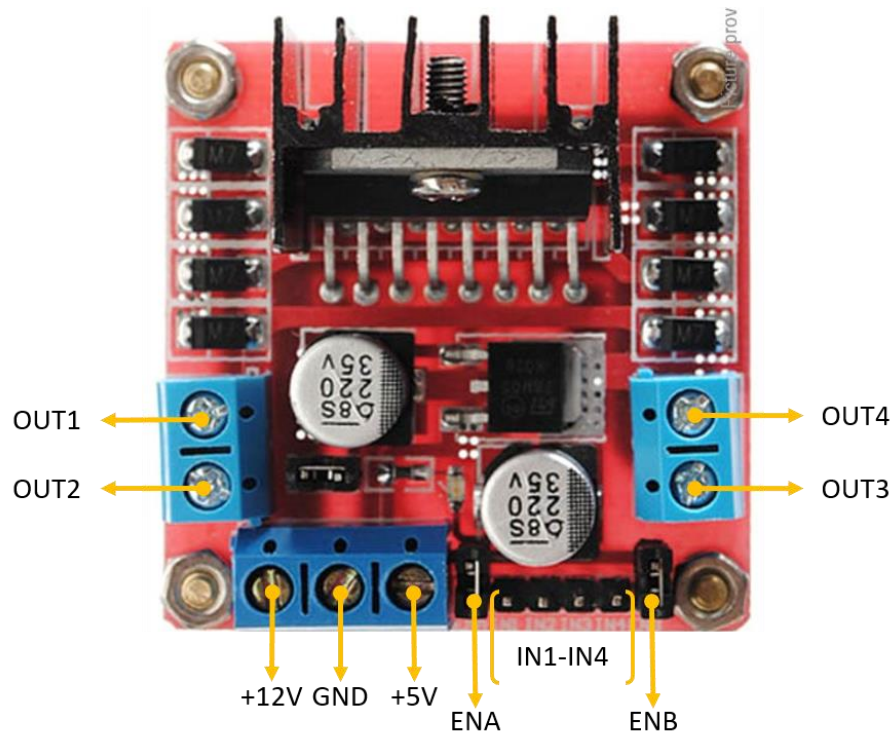


Figura 53: Diagrama de conexiones (pinout) del controlador de motores L298N.

Tabla 6: Descripción del diagrama de conexiones (pinout) del controlador de motores L298N.

Pin	Denominación	Función
OUT1 OUT2	Terminal de motor A	Alimenta el motor A según la dirección que el controlador indique.
OUT3 OUT4	Terminal de motor B	Alimenta el motor B según la dirección le controlador indique.
+12V	Pines de alimentación (<i>power pins</i>)	Alimenta el controlador de motores con un voltaje de 5 [V] a 35 [V].
+5V		Alimenta el controlador de motores con un voltaje de 5 [V]. Puede ser usado como una salida de 5 [V].
GND	Tierra común	Conecta la tierra del controlador de motores a la tierra del controlador principal.
ENA	Pines de habilitación (<i>enable pins</i>)	Habilita el uso del terminal de motores A. Es un pin PWM que ajusta la potencia que es entregada al motor A según indique la programación.
ENB		Habilita el uso del terminal de motores B. Es un pin PWM que ajusta la potencia que es entregada al motor B según indique la programación.
IN1 IN2	Pines lógicos (<i>input 1-4</i>)	Reciben la información lógica del controlador principal y determinan la dirección de giro del motor A.
IN3 IN4		Reciben la información lógica del controlador principal y determinan la dirección de giro del motor A.

Por su parte, tanto las conexiones del motor como las del *encoder* tienen una unión común en el conector JST hembra de 6 pines que puede observarse en la Fig. 54 y que se explican luego en la Tabla 7. Es necesario aclarar que las conexiones del motor van conectadas al puente H mientras que las conexiones correspondientes al *encoder* van directamente al controlador principal. Esto se debe a que el *encoder* necesita de un voltaje de alimentación menor a los 5 [V] que puede entregar el controlador de motores por su salida de alimentación alternativa y a que la información sensada por el éste debe ser procesada por el Arduino directamente.



Figura 54: Conexiones del conector JST de 6 pines del motor y encoder. La salida posee un conector hembra, mientras que el conector macho está asociado a los cables de conexión que se observan a la derecha en colores.

Tabla 7: Descripción de las conexiones del conector JST de 6 pines del motor y encoder.

Pin	Denominación	Función
M1	Pines de alimentación del motor.	Conectados a los bornes del motor. Al circularse corriente por ellos se produce el giro del motor. Se conectan a un terminal de motor en el puente H.
M2		
VCC	Pin de alimentación del <i>encoder</i> .	Alimentan el <i>encoder</i> con un voltaje continuo de 3.3 [V] provisto por el Arduino. Se conectan directamente al controlador principal.
GND	Tierra de alimentación del <i>encoder</i> .	
C1	Canales de comunicación del <i>encoder</i> .	Comunican la información captada por los sensores del <i>encoder</i> de manera digital. Se conectan directamente a pines digitales del Arduino para ser interpretada por medio de programación.
C2		

7.1.2.2 Primera iteración del módulo actuador

Habiendo identificado las conexiones de los componentes involucrados en el módulo actuador, se procede a el ensamblaje de éste en base al diagrama de circuito antes propuesto. Las conexiones realizadas fueron las siguientes:

- Los pines M1 y M2 del motor de 6 [V] seleccionado en la sección 7.3.2 fueron conectados al terminal A del controlador de motores por medio de los cables de la extensión con conector JST.
- Los pines ENA, IN1 e IN2 del controlador de motores fueron conectados por medio de *jumpers* H-M a los pines digitales 5(PWM), 6 y 7, respectivamente.
- Se conectaron dos *jumpers* para alimentación al puente H. Un *jumper* M-M corto fue conectado a la alimentación de +12 [V], mientras que otro fue modificado para tener tres extremos tipo “macho” de manera que pudiera conectarse tanto al negativo de la fuente de voltaje como a la tierra del Arduino.
- La alimentación fue provista por una pila de 9 [V], la cual sólo fue sujeta a las conexiones antes descritas por medio de cinta aislante al momento de hacer las pruebas.

Posteriormente, se implementó un programa (Anexo 1) para controlar la posición del motor. El programa se encarga de recibir y procesar la información del *encoder* para calcular el ángulo en que se encuentra el eje respecto a su posición inicial y la compara con una posición deseada. En base a la diferencia entre el valor leído y el valor deseado, un controlador PID se encarga de controlar la potencia y dirección de giro que se entrega al motor para así lograr obtener la posición deseada con precisión.

El ajuste del controlador, en esta instancia, fue realizada por medio de ensayo y error. No se logró ajustar perfectamente los factores, por lo que a pesar de que el sistema se acercaba al ángulo deseado, existía oscilación con un error máximo de aproximadamente 3°. No se insistió en ajustar los parámetros del controlador debido al muy posible reemplazo del motor y la eventual integración a la probeta. Esto se debe a que, como se mencionó anteriormente, la materialidad del sistema afecta directamente los factores a utilizar.

7.1.2.3 Segunda iteración del módulo actuador

El módulo actuador fue actualizado en una segunda ocasión a motivo de la primera probeta modular generada por Gajardo^[2] en el marco de su memoria de título, la cual puede observarse en la Fig. 55. En esta ocasión, se fabricaron conexiones de alimentación para el controlador de motores, las cuales incluían un adaptador para la pila de 9 [V] y un interruptor de tres estados (de los cuales sólo dos fueron habilitados).



Figura 55: Primera probeta modular para pruebas del módulo actuador. Se observa la flexión del sistema provocada por la acción del motor acoplado al lado derecho.

El motor anterior fue reemplazado por modelo similar con mayor par nominal. Las especificaciones del motor utilizado se encuentran en la Tabla 8. Se realizan las conexiones del motor y el *encoder* utilizando una placa de prototipado (*breadboard*) como intermediario a modo de facilitar el cableado. Se ajusta un controlador proporcional utilizando el método de respuesta en frecuencia de Ziegler-Nichols, lo que basta para obtener resultados aceptables. No se ajustaron los factores integral y derivativo debido a que la materialidad del sistema y el motor no eran los definitivos.

Tabla 8: Especificaciones del motor 12GA-6-30E. (Fuente: <https://bit.ly/2NG30ku>).

Modelo	12GA-6-30E
Voltaje nominal	6 [V]
Relación de reducción	298:1
Dimensiones	27×10×12 [mm]
Velocidad del motor	30 [rpm]
Velocidad sin carga (con reducción)	22 [rpm] a 6 [V]
Par nominal	12 [N×cm]

En esta iteración, se logra obtener grandes flexiones de la probeta según se indicaba directamente por medio del código. Esto quiere decir que el controlador Arduino se encontraba conectado al computador y permitía modificar el ángulo de posición del motor directamente en el código. Es importante mencionar que era necesario devolver el motor a su posición inicial antes de desenergizar el sistema, pues el *encoder* no posee un cero absoluto.

7.1.2.4 Tercera iteración del módulo actuador

La última modificación que se hizo a los componentes del módulo actuador fue hecha al momento de integrarlo a la probeta final. En dicha ocasión, se optó por reemplazar el motor utilizado en la segunda iteración por otro similar que poseía un tornillo sin fin en su acople. Esto permitió que al desenergizarse el módulo, la resistencia ante la flexión del prototipo no devolviera el perfil alar a un estado de menor flexión. Sin embargo, el torque nominal de este motor es menor y no existe una alternativa de iguales dimensiones que proporcione un mayor torque. El motor utilizado puede observarse en el plano de la Fig. 56, mientras que sus especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 9.

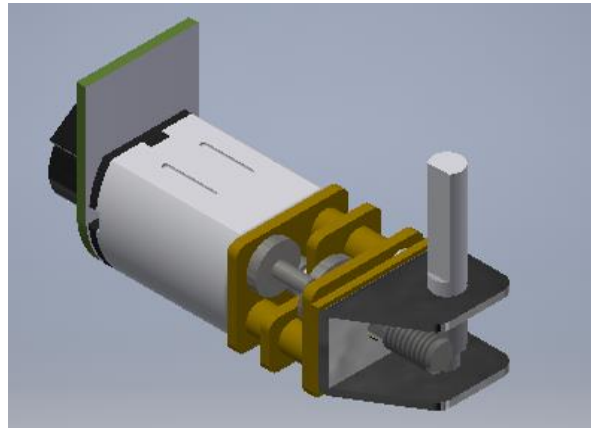


Figura 56: Motor utilizado en la iteración final del módulo actuador. El acople se encuentra en 90° al eje del motor y posee un tornillo sin fin que evita que el eje retroceda. Fue cortado para ajustarse a la probeta. (Fuente: Gajardo^[2]).

Tabla 9: Especificaciones técnicas del motor GW12GA-9E. (Fuente: <https://bit.ly/31zyDo2>).

Modelo	GW12GA-9E
Voltaje nominal	12 V
Relación de reducción	2280:1
Dimensiones	36×17×10 mm
Velocidad del motor	9 rpm
Velocidad sin carga (con reducción)	7 rpm a 12V
Par nominal	8 N×cm

Otra modificación que se realizó al módulo actuador fue en su alimentación. Las conexiones que se integraron en la segunda iteración a modo de facilitar la conexión de la pila de 9 [V] fueron modificadas de manera que un transformador de corriente pudiese ser conectado para energizar el controlador de motores con una corriente continua de 12 [V] proveniente directamente desde la red. Para ello, se reemplazó el adaptador de pilas de 9 [V] que se unía a la tierra y al interruptor del controlador de motores y se reemplazó por dos *jumpers* con conector hembra. Por su parte, al adaptador de corriente se le cortó la conexión existente y a los cables positivo y negativo se le adaptaron conectores macho afines con los de los *jumpers*.

7.1.3 Ensamblaje y Habilitación del Módulo Sensor

El módulo sensor está formado por tres componentes electrónicos: los sensores de presión, el multiplexor y el *shield*. Este último fue tratado en el punto 7.1.1 por su posicionamiento en el sistema. Los sensores debieron ser habilitados previo a su utilización, tanto en términos físicos como por medio de código. Por su parte, el multiplexor sólo necesitó del ajuste del código provisto por el fabricante para hacer uso de múltiples sensores con la misma dirección I²C. Por último, se incorporó al código un método de adquisición de datos que permite registrar las lecturas de los sensores en una hoja de cálculo en MS Excel.

7.1.3.1 Habilitación de los sensores de presión

La habilitación de los sensores consta de dos etapas: el acondicionamiento de las placas *breakout* para su conexión a los demás componentes electrónicos y la implementación de un código que permita hacer lectura de la información que se requiere utilizar.

Acondicionamiento de los sensores

El sensor seleccionado en el punto 6.3.3.1 corresponde a un circuito integrado que incluye en su construcción al sensor en sí. Este circuito integrado o placa *breakout* se encarga de captar información por medio del sensor, procesarla y finalmente comunicarla mediante el protocolo I²C, lo que a su vez permite que la información sea extraída de manera sencilla y utilizando pocas conexiones. La placa *breakout* del sensor cuenta con seis conexiones de las cuales sólo cuatro (Fig. 57) son necesarias para su funcionamiento.

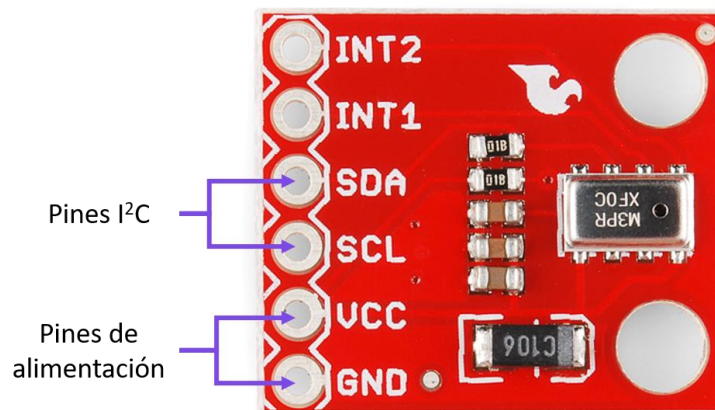


Figura 57: Conexiones que fueron acondicionadas para el funcionamiento de la placa sensor.

En una primera instancia, se soldó a los sensores pines macho en forma de "L". Esto permitió la conexión de cables H-M que fueron utilizados para hacer prueba de los sensores directamente en el Arduino de manera individual una vez implementado el código para hacerlo.

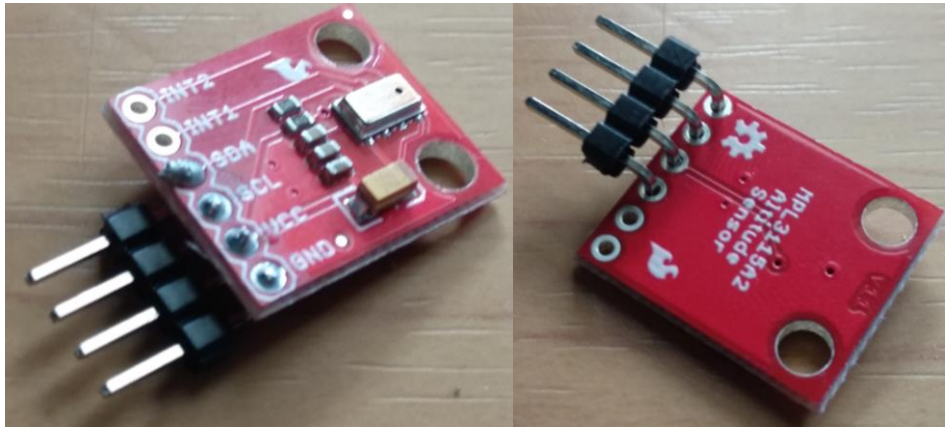


Figura 58: Vista superior e inferior de un sensor al que le fueron soldados pines en forma de "L".

Implementación del código de lectura de sensores

Una de las razones principales por las que se decidió la utilización de productos de SparkFun es debido a que en su página de ventas poseen recursos educativos que permiten hacer uso autodidacta de sus productos. Además de facilitar de una guía de conexión para este sensor, el proveedor entrega librerías y códigos de ejemplo para hacer uso de sus componentes electrónicos de manera sencilla. Gracias a esto, bastó con descargar y habilitar las librerías del sensor y modificar levemente el código de ejemplo para lograr que el sensor comunicara al controlador sólo información sobre sus lecturas de presión. El código de ejemplo provisto por el fabricante modificado puede verse en el Anexo 2.

7.1.3.2 Habilitación del multiplexor

Al momento de habilitar el multiplexor se cayó en cuenta de que los cables de conexión *Qwic* no venían incluidos con el componente y se procede a buscar un reemplazo en el comercio local, ya que dichas conexiones corresponden a conectores JST de 4 pines y 1 mm de espaciamiento. Sin embargo, en el comercio local de Viña del Mar y Santiago no se encuentra disponibilidad de cables con conectores JST de un tamaño tan pequeño, por lo que se debieron encargar los cables directamente al proveedor del componente. Es en esta instancia que se decide incluir el *Shield I²C* en el sistema, a modo de facilitar la conexión del multiplexor al controlador.

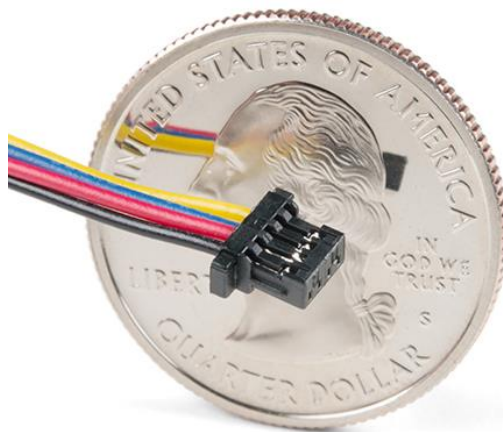
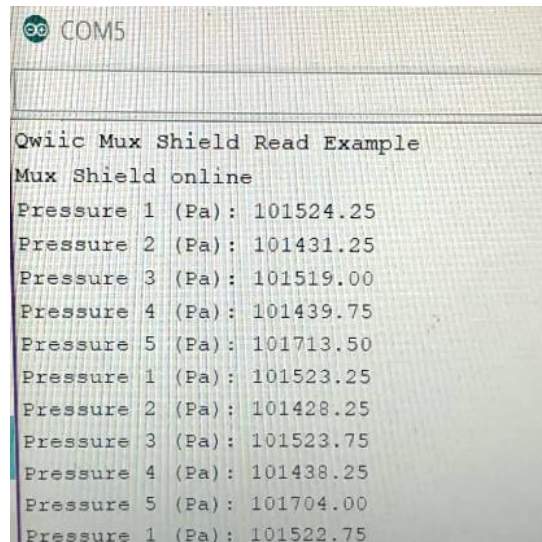


Figura 59: Referencia de tamaño del conector *Qwic* disponible en la página de SparkFun. (Fuente: <https://bit.ly/2NMmuEa>).

Una vez obtenidos los cables de conexión, el uso del multiplexor fue inmediato gracias al código de ejemplo provisto por SparkFun. Se implementan funciones para activar y desactivar los puertos del multiplexor dentro del código de lectura de los sensores, lo que a su vez permite extraer información de los seis sensores de manera intercalada (Anexo 3) y, gracias a la comunicación serial, se logra observar dicha información a través del monitor serial en el computador, como se observa en la Fig. 60.



```
COM5
Qwiic Mux Shield Read Example
Mux Shield online
Pressure 1 (Pa): 101524.25
Pressure 2 (Pa): 101431.25
Pressure 3 (Pa): 101519.00
Pressure 4 (Pa): 101439.75
Pressure 5 (Pa): 101713.50
Pressure 1 (Pa): 101523.25
Pressure 2 (Pa): 101428.25
Pressure 3 (Pa): 101523.75
Pressure 4 (Pa): 101438.25
Pressure 5 (Pa): 101704.00
Pressure 1 (Pa): 101522.75
```

Figura 60: Lectura de los sensores de presión 1 al 5 de manera intercalada en el monitor serial.

Cabe destacar que, hasta este paso del trabajo, la información captada y procesada no era recolectada y guardada, sino que era observable sólo en el momento que el controlador la compartía con el computador por el puerto USB y ésta era expuesta en el monitor serial de Arduino IDE.

7.1.3.3 Adquisición de los datos sensados

Si bien el registro de los datos captados por el módulo sensor no es necesario para el funcionamiento de un eventual sistema de control automático de la flexión del aparato, esta acción sí es imprescindible a la hora de implementar dicho sistema. El monitoreo instantáneo de la presión en los puntos de medición permite observar perturbaciones puntuales, más no es suficiente a la hora de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de medición implementado o estudiar el comportamiento de la presión sobre el manto del perfil alar.

Existen múltiples métodos para lograr el registro de la información, entre ellos se encuentran el implementar una parte del código para que los datos sean escritos directamente en un archivo de texto o el uso de componentes electrónicos específicamente diseñados para registrar datos. Habiendo hecho una pequeña investigación en foros de la comunidad de Arduino, se logró encontrar una herramienta de adquisición de datos que toma la información comunicada a través del puerto serial y la escribe directamente en una hoja de cálculo en MS Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	Time	Timer	Counter	millis				
2	07-05-17	4:06:32 PM	1.933594	0	151	Open PLX DAQ UI			
3	07-05-17	4:06:32 PM	1.996094	1	194				
4	07-05-17	4:06:32 PM	2.027344	2	238				
5	07-05-17	4:06:32 PM	2.058594	3	282				
6	07-05-17	4:06:32 PM	2.105469	4	325				
7	07-05-17	4:06:32 PM	2.167969	5	369				
8	07-05-17	4:06:33 PM	2.195313	6	413				
9	07-05-17	4:06:33 PM	2.261719	7	456				
10	07-05-17				500				
11	07-05-17				544				
12	07-05-17				587				
13	07-05-17				632				
14	07-05-17				677				
15	07-05-17				721				
16	07-05-17				766				
17	07-05-17				812				
18	07-05-17				856				
19	07-05-17				901				
20	07-05-17				946				
21	07-05-17	4:06:33 PM	2.773438	19	990				
22	07-05-17	4:06:33 PM	2.820313	20	1035				
23	07-05-17	4:06:33 PM	2.867188	21	1081				

Figura 61: Imagen de la hoja de cálculo asociada a PLX-DAQ V2 sin intervenir.

Parallax Data Acquisition Tool o PLX-DAQ (Fig. 61) es un software de extensión para MS Excel con interfaz de usuario que permite la recolección y análisis en tiempo real de la información captada por los sensores asociados a un microcontrolador, lo que la hace ideal para la tarea que se busca realizar. Aunque la herramienta dejó de ser actualizada por Parallax Inc. en febrero del 2014, un usuario del foro de Arduino (<https://bit.ly/31upxsB>) actualizó la herramienta por su cuenta en 2017 y logro hacer que operara en versiones más modernas de MS Office y aportó una guía para su utilización .

El programa es capaz de registrar los datos que se comunican por un puerto USB identificado previamente, a una frecuencia de comunicación específica y sólo si estos son escritos de manera que el código del programa pueda interpretarlos y ubicarlos correctamente en la hoja de cálculo. Teniendo esto en cuenta, se modificó el código que se utilizaba para leer los seis sensores de presión a través del multiplexor para que escribiera la información de manera que la herramienta PLX-DAQ pudiese recopilarla. El código resultante puede ser leído en el Anexo 4. Cabe destacar que la herramienta es poco robusta en términos de estabilidad, por lo que se debe evitar el uso del monitor serial de Arduino IDE o realizar otras tareas en el computador durante su funcionamiento, pues puede ocasionar que MS Excel se cierre por un error fatal y se pierdan los datos

7.2 Integración de los Módulos Funcionales a la Probeta

La integración a la probeta fue realizada en conjunto con Gajardo^[2], quien se encargó de la instalación del motor y los sensores en el prototipo en sus lugares correspondientes, mientras que la adaptación de conexiones y la construcción y alargado de cables de comunicación y alimentación fue realizada por mi parte. A continuación, se describe en mayor detalle las acciones realizadas para integrar el sistema de recopilación de datos a la probeta.

7.2.1 Integración del Módulo Actuador

7.2.1.1 Instalación del motor en la probeta

El motor GW12GA-9E fue adquirido e instalado directamente por Gajardo^[2], quien diseñó en la probeta un espacio para acoplarlo y un eje que permitía transmitir el torque a lo largo del perfil alar. También, debido al limitado espacio, se vio en la necesidad de cortar parte de la carcasa de la caja de reducción a fin de poder adaptar el motor, como se observa en la Fig. 62.



Figura 62: Motor instalado en la probeta. Se realizó un corte en diagonal en la carcasa para poder instalarlo en su posición sin modificar el tamaño del modelo impreso con anterioridad.

Al momento de instalar el motor en la probeta, Gajardo^[2] se encargó de extender la conexión de comunicación y alimentación del motor para que pudiese salir por el punto central de la probeta, lugar donde se ubica el anclaje para el túnel de viento y por donde saldrían todos los cables pertenecientes al sistema de medición. En la Fig. 63 se puede observar un modelo 3D de la composición del eje y se indica el punto por donde pasan los cables de los sensores al borde de ataque para luego salir de la probeta por la parte inferior del borde de ataque.

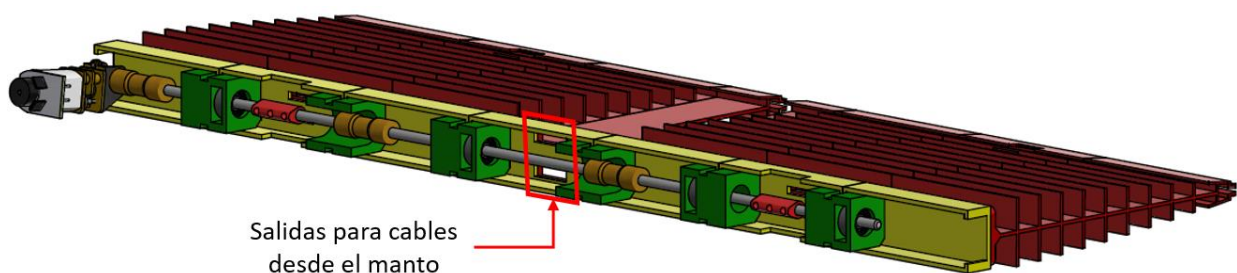


Figura 63: Modelo 3D del acople entre el motor y el eje de transmisión. En el punto central a lo largo de la envergadura se encuentran dos orificios rectangulares para el paso de los cables que vienen desde el manto. (Fuente: Gajardo^[2]).

7.2.1.2 Alargado de cables de comunicación y alimentación

Si bien Gajardo^[2] realizó una extensión de cables previa, estos no eran lo suficientemente largos como para conectarlos al resto del módulo actuador al momento de instalar el banco de pruebas para la recopilación de datos en el túnel de viento. Es por esta razón que los cables debieron ser extendidos nuevamente.

El proceso de extensión de cables es relativamente simple y consta de los siguientes pasos:

1. Se extrae el recubrimiento plástico de las puntas de los cables que se quiere unir. Para ello se puede usar un bisturí, un cuchillo cartonero o un pelacables. Se debe extraer entre 1 y 2 [cm] de cada punta.
2. Si se cuenta con *tubing* termo-retráctil, se corta un tubo del largo que se estime necesario para cubrir la unión posteriormente. Se hace pasar por uno de los cables a unir.
3. El núcleo de ambos cables, formado por múltiples hilos de cobre, debe ser separado. Posteriormente se deben trenzar ambos extremos a modo de unir los cables. Mientras menos cobertura plástica se haya quitado, más complicada es esta tarea.
4. Una vez trenzados, se aplica con una varilla un poco pasta flux sobre la unión. Esto permitirá limpiar los cables de impurezas. Desde esta etapa es bueno ocupar algún tipo de soporte que permita mantener el cable suspendido en el aire.
5. Con un cautín, se calienta la unión de los cables trenzados desde abajo. El flux aplicado se derretirá. Luego, por la parte superior de la unión se aplica estaño en poca cantidad.
6. Finalmente, se desliza el *tubing* termo-retráctil previamente ubicado hasta la zona de la unión y se aplica calor con un encendedor o pistola de calor. La unión quedará sellada y firme.

Si bien los colores de los cables de la unión original que alimentaba y comunicaba tanto al motor como al *encoder* no pudieron ser mantenidos en toda la extensión de los cables alargados, se procuró mantener los extremos con los mismos colores a fin de facilitar la conexión al controlador.

7.2.1.3 Adaptación de las conexiones de alimentación

Como se mencionó con anterioridad en el párrafo final del punto 7.1.2.4, para esta tercera iteración del módulo actuador se cambió la fuente de alimentación desde una pila de 9 [V] a un adaptador de corriente AC/DC variable que permite aportar 12 [V] al sistema, similar al que se observa en la Fig. 64.



Figura 64: Adaptador AC/DC. Permite transformar la corriente alterna de la red a corriente continua entre 3 [V] y 12 [V].

Para su conexión al módulo actuador, se cortó la salida original del adaptador y se separaron los cables positivo y negativo, para luego agregar pines macho a cada cable. Por su parte, las terminales de alimentación del puente H fueron modificadas para tener conexiones hembra que dieran a la tierra y al interruptor del terminal positivo.

7.2.2 Integración del Módulo Sensor

7.2.2.1 Eliminación de los pines de los sensores

Durante el proceso de concepción del prototipo, se llegó a la conclusión de que era necesario eliminar las costillas de la parte central de la probeta debido a que se necesitaba bastante espacio para incluir los sensores. Sin embargo, y a pesar de las consideraciones tomadas, el espacio aún fue insuficiente para poder realizar las conexiones de los sensores con libertad. Por esta razón, se decidió prescindir de los pines en “L” previamente instalados y soldar los cables de conexión directamente a los sensores.

Conexiones realizadas previo a los ensayos preliminares

Las conexiones directas a los sensores debieron ser hechas en dos ocasiones, debido a que existieron cortes en las uniones posterior a los ensayos preliminares realizados. El proceso de unión previo a los ensayos consistió en los siguientes pasos:

1. Se cortaron los conjuntos de cuatro pines en “L”, unidos por un recubrimiento plástico, para poder desoldarlos individualmente. Se ajustó el sensor en un soporte y, con el caudín, se calentó el pin lo suficiente para que el estaño se derritiera y el pin pudiese retirarse utilizando pinzas.
2. Usando cables trenzados de poco diámetro, se prepararon extensiones de cuatro vías para soldar directamente a los sensores. Para ello se extrajo la cobertura plástica de las puntas de los cables y se torció el núcleo para formar una “L” que permitiera introducirse en los puertos del sensor. Las puntas fueron estañadas para obtener mayor resistencia.
3. Los puertos del sensor quedaron obstruidos por el estaño residual, por lo que era necesario calentarlo directamente y pasar las puntas estañadas de los cables de manera rápida y precisa para evitar estropear los sensores. El trabajo se realizó utilizando un soporte para el sensor, pinzas, el caudín y el estaño adicional. El resultado puede ser visto en Fig. 65.

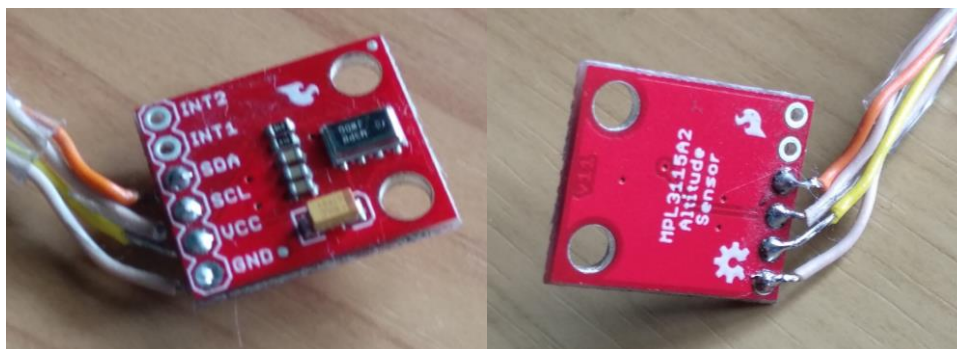


Figura 65: Vista superior e inferior de uno de los sensores con las conexiones soldadas directamente. Los cables fueron cortados diagonalmente para facilitar su orientación a la salida y evitar que las uniones soldadas sufrieran mucha carga.

Conexiones realizadas posterior a los ensayos preliminares

Debido a que tras los ensayos preliminares algunas uniones se cortaron, se decidió buscar una forma de evitar que éstas estuvieran sujetas a cargas durante el funcionamiento del aparato. Para ello, se concibió una forma simple pero efectiva de amortiguar las cargas: hacer

un doblez al cable y adherirlo a la parte inferior de la placa. La configuración final de los sensores y sus cables de comunicación y alimentación se puede observar en la Fig. 66.

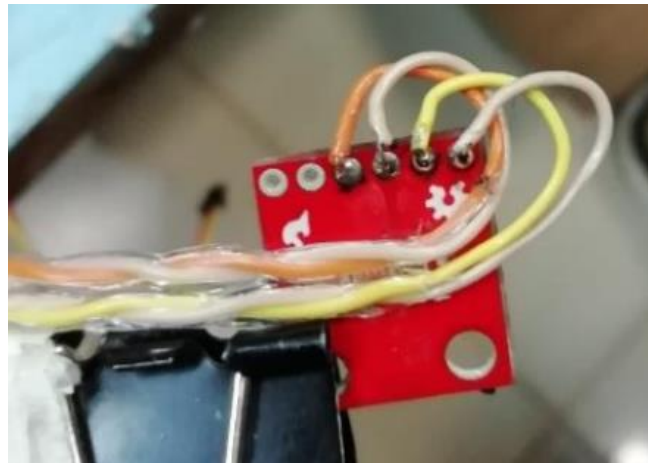


Figura 66: Unión directa de los cables al sensor y método de amortiguación de cargas sobre la unión.

Código de color de los cables de comunicación y alimentación

Los cables de comunicación y alimentación de los sensores también fueron alargados mediante el mismo proceso descrito en el punto 7.2.1.2. Si bien los cables utilizados en las extensiones no obedecen ningún patrón de colores, se procuró mantener los mismos colores que utilizan los conectores Qwiic del multiplexor para cada puerto en el extremo de unión. Además de que se agregó identificadores con el número del sensor asociado a cada conjunto de cables. De esta manera, se asegura que los sensores sean conectados correctamente y en un orden que permita analizar su comportamiento posteriormente. La Fig. 67 muestra el código de color del conector Qwiic cuando se conecta a un puerto del multiplexor.

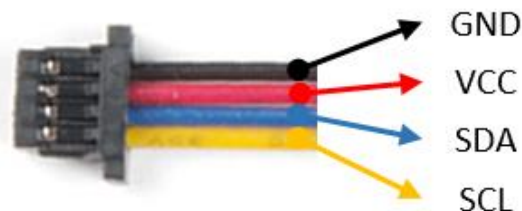


Figura 67: Código de color para cada cable de un conector Qwiic al ser conectado a un puerto del multiplexor.

7.2.2.2 Instalación de los sensores en el manto

Al igual que en el caso del motor, Gajardo^[2] se encargó de realizar la instalación de los sensores en el manto de la probeta. Debido al fallo de algunos sensores después de los ensayos preliminares y a que se observó un comportamiento inesperado de la presión en los registros de dichas pruebas, se realizó la instalación de los sensores del manto en dos ocasiones.

Instalación de los sensores previo a los ensayos preliminares

Para instalar los sensores en la probeta, el manto fue mecanizado con orificios que permitían salir sólo los componentes sobresalientes de la placa del sensor, como se observa en la Fig. 68.

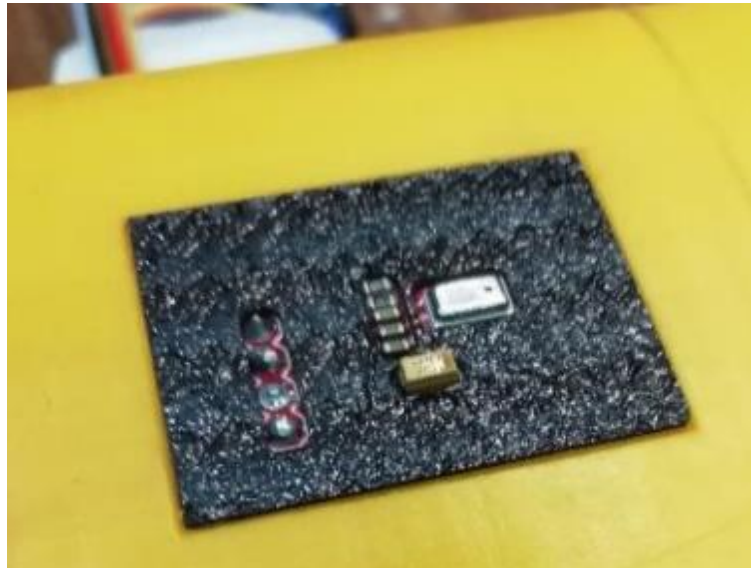


Figura 68: El sensor instalado en el borde de ataque fue acomodado en un módulo del mismo material que el manto y luego adherido al armazón del prototipo.

Los sensores fueron instalados por la parte posterior del manto mediante el uso de distintos adhesivos. La Fig. 69 muestra el resultado de la instalación realizada con cinta aislante como base adherente y con cianocrilato para unir los sensores en las esquinas.



Figura 69: Vista inferior del manto. Los sensores fueron instalados usando cinta aislante como base y luego las esquinas de las placas fueron pegadas usando cianocrilato.

Instalación de los sensores posterior a los ensayos preliminares

Tras la ruptura de conexiones de algunos sensores y la falla completa de un sensor por contacto con el cianocrilato, fue necesario hacer modificaciones en la instalación de los sensores. El problema de la ruptura de uniones entre cables y sensor se solucionó con el método descrito en el punto anterior. Sin embargo, la falla total de uno de los sensores obligó a reubicar un sensor funcional desde el manto inferior al manto superior, optándose por el sensor inferior más cercano al borde de ataque, por considerarse que éste era el más afectado por la interferencia de el anclaje al túnel de viento y de los cables de todo el sistema. La posición final de los cinco sensores funcionales se observa en la Fig. 70.

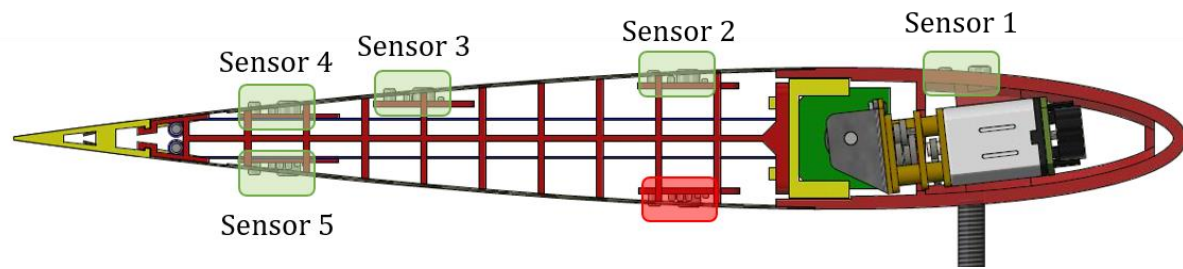


Figura 70: Posición final de los sensores en la probeta. En verde, la posición de los sensores funcionales. En rojo, el sensor que fue eliminado por falla.

En los registros de los ensayos preliminares, se observó que, a pesar de que se observaban tendencias bastante prometedoras en los registros, existían algunas inconsistencias con la teoría. Se atribuyó dichas discrepancias a que la parte sobresaliente del sensor funcionaba como un generador de vórtices y eso afectaba la estabilidad del flujo en los puntos de lectura. Por esta razón se decide aprovechar la extracción del sensor fallado para nivelar los sensores tratando de que el transductor quedase a ras del manto. Gajardo^[2] ajustó la altura de los sensores utilizando espaciadores de cinta aislante.

7.3 Ensayos de Funcionamiento y Resultados Obtenidos

Posterior a la integración de los elementos electrónicos del sistema de control a la probeta definitiva, se realizaron ensayos de funcionamiento en repetidas ocasiones a fin de obtener información que permitiera continuar con la implementación de éste. Existieron dos ensayos preliminares que buscaban determinar si existía un correcto funcionamiento del sistema de recopilación de datos, así como si los datos recopilados entregaban información útil para el desarrollo del sistema de control. Posterior a dichos ensayos, se realizaron pruebas bajo un protocolo de medición que nos permitió obtener información del comportamiento que presenta la presión sobre el manto del perfil al ser flexionado efectivamente cambiando su curvatura.

En la presente sección se describe el equipo utilizado para los ensayos y la instalación de la probeta en el túnel de viento. Posteriormente, se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos a través de ellas. Se incluyen también consideraciones realizadas durante y posterior a los ensayos.

7.3.1 Equipo Utilizado en los Ensayos

Debido a que el prototipo de perfil alar es un instrumento de medición en sí mismo, no se necesitó de mucho equipo adicional para realizar los ensayos. A continuación, se describen los elementos utilizados tanto para la preparación como para la realización de las pruebas de funcionamiento.

7.3.1.1 Túnel de viento

El principal equipo utilizado para la realización de los ensayos es el túnel de viento del Laboratorio de Termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, visible en la Fig. 71.

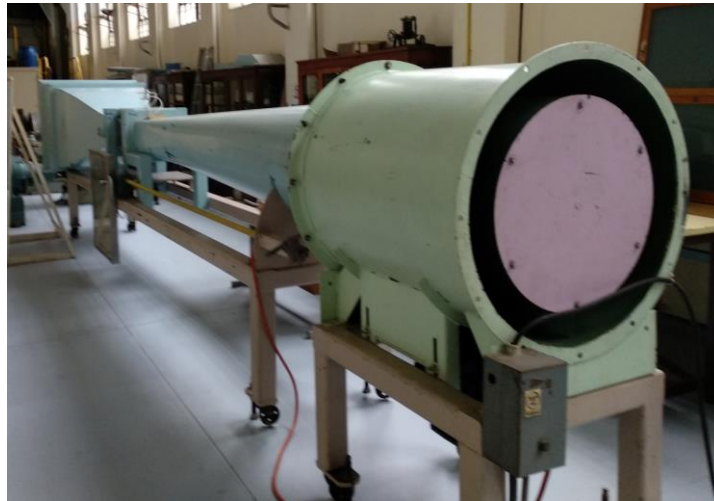


Figura 71: Túnel de viento del Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM.

El túnel es un equipo que se utiliza para simular condiciones de flujo de aire y ver su efecto sobre objetos que se posicionan en la cámara de ensayo. La velocidad del viento puede ser controlado por medio de una manivela, pero debe ser medida por medio de un aparato externo ya que el instrumento de medición de velocidad original no se encuentra en funcionamiento. El túnel también cuenta con un anclaje en la cámara de ensayos que está unido a dos dínamos que permiten medir las fuerzas de arrastre y sustentación que se generan sobre el objeto por acción del flujo de viento. Las fuerzas medidas por los dínamos pueden ser leídas en un par de relojes ubicados justo en frente a la cámara de ensayo, los que pueden ser observados en la Fig.72.

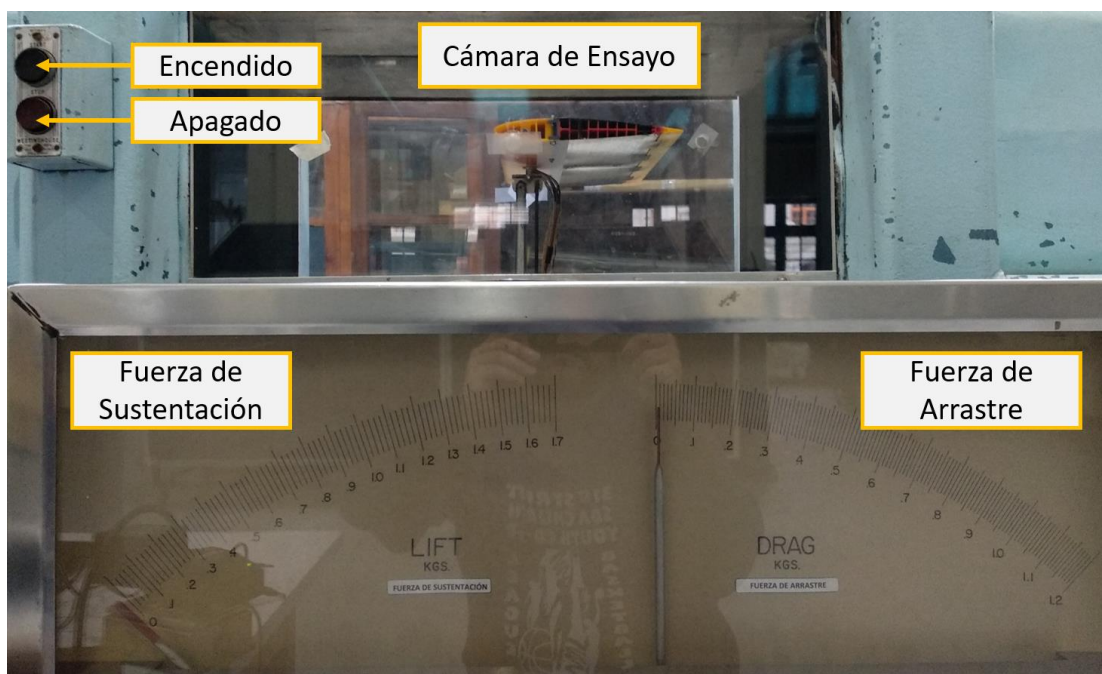


Figura 72: Cámara de ensayo (al centro, arriba) y relojes de sustentación y arrastre (esquina inferior izquierda y derecha, respectivamente).

Algunas características técnicas relevantes del túnel de viento utilizado se encuentran resumidas en la Tabla 10, a continuación:

Tabla 10: Especificaciones técnicas relevantes del túnel de viento y sus instrumentos de medición.

Túnel de Viento	
Tipo	Abierto Subsónico
Dimensiones de la Cámara de Ensayo	350×350×400 [mm ³]
Rango de Velocidades	0.5 a 80.0 [m/s]
Instrumentos de Medición	
Fuerza de Arrastre	Rango: 0 – 1.70 [kgf] Resolución: 0.02 [kgf]
Fuerza de Sustentación	Rango: 0 – 1.20 [kgf] Resolución: 0.01 [kgf]

Es importante mencionar que, una vez anclado el objeto a ensayar, es necesario ajustar los ceros de las balanzas de sustentación y arrastre de forma manual utilizando perillas. Este es un proceso complicado debido a que las balanzas son altamente sensibles a dicho ajuste. Además, debido a la antigüedad del equipo, no se considera que las mediciones entregadas sean de total fidelidad, por lo que sólo se utilizarán de manera referencial.

7.3.1.2 Anclaje para perfiles alares

El Laboratorio de Termofluidos tiene a su disposición distintos elementos que se utilizan para realizar experiencias de laboratorio en el túnel de viento. Uno de esos elementos corresponde a un perfil alar que posee una barra de anclaje que tiene la capacidad de modificar el ángulo de ataque del perfil. Aprovechando la disponibilidad de dicho anclaje, se fabricó la probeta para coincidir con la unión de la barra y el perfil, lo que se puede observar en la Fig. 73.

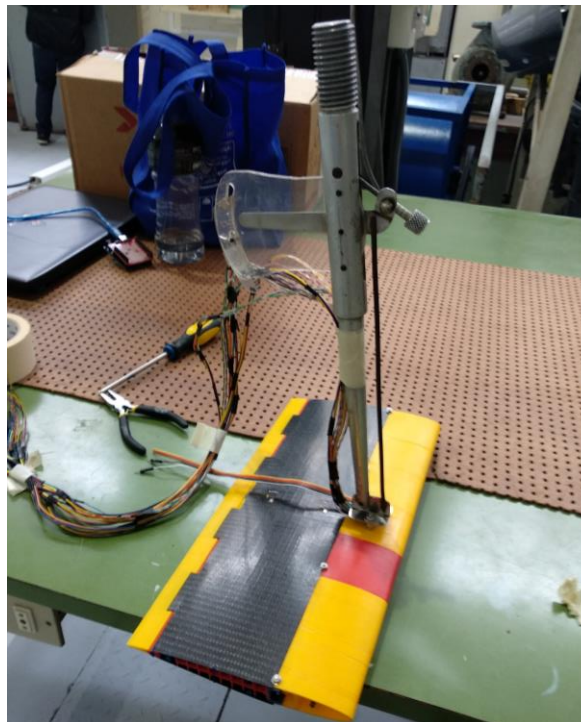


Figura 73: Probeta unida al anclaje del túnel de viento. Permite regular el ángulo de ataque con una resolución de 2°.

El instrumento de anclaje se acopla al túnel de viento por medio de su extremo roscado, permitiendo que las fuerzas de sustentación y arrastre sean medidas. Además, cuenta con una perilla que se encarga de ajustar la posición de una barra que, a su vez, ajusta el ángulo de ataque e indica el ángulo en un transportador. Si bien se diseñó el perfil para utilizar este instrumento, es importante verificar que el cero del transportador coincida con el ángulo de ataque neutro del perfil, lo que se puede realizar utilizando un nivel que coincida con el largero del perfil cuando éste se encuentra con flexión nula.

7.3.1.3 Anemómetro digital de alambre caliente

Debido a que el instrumento de medición de velocidad del túnel de viento no se encuentra en funcionamiento, es necesario medir con un instrumento externo la velocidad del flujo al regularla. Para ello, la cámara de ensayos tiene una perforación, usualmente tapada, que permite introducir la varilla de un anemómetro de alambre caliente para realizar dicha medición.



Figura 74: Anemómetro de alambre caliente marca TSI, modelo VelociCalc Plus 8386.

El anemómetro utilizado fue el modelo VelociCalc Plus 8386 de la marca TSI, observable en la Fig. 74. Las especificaciones técnicas relevantes del modelo pueden ser encontradas en la Tabla 11, a continuación:

Tabla 11: Especificaciones técnica del anemómetro digital.

Anemómetro Digital	
Marca	TSI Incorporated
Modelo	VelociCalc Plus 8386
Velocidad	
Rango	0 - 50 [m/s]
Resolución	0.01 [m/s]
Precisión	± 0.015 [m/s]
Temperatura de Operación	
Aparato	5 - 45 [°C]
Varilla	-10 - 60 [°C]
Temperatura de Almacenaje	-20 - 60 [°C]
Alimentación	Cuatro pilas AA o adaptador A/C

7.3.2 Instalación del Prototipo en el Túnel de Viento

Como se explicó anteriormente, la probeta fue instalada en el túnel de viento utilizando un anclaje roscado que tiene directa conexión con las balanzas que permiten medir la sustentación y el arrastre. El perfil alar puede observarse en la Fig. 75, donde se encuentra instalado en la cámara de ensayo.

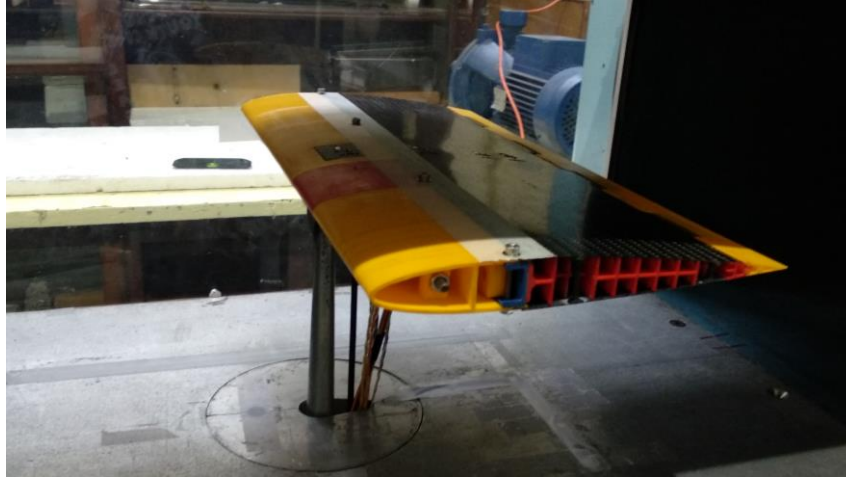


Figura 75: Probeta instalada en el túnel de viento. Los cables pasan por detrás de la barra que se encarga de aplicar la fuerza para el cambio de ángulo de ataque.

Posterior a la instalación, se aseguró que la envergadura del perfil se encontrara perpendicular al flujo de viento y luego, con ayuda de un nivel, se comprobó que el cero del transportador del anclaje coincidiera con la posición neutra del perfil sin flectar. Los cables del sistema de medición fueron amarrados al anclaje utilizando cinta adhesiva de papel y conectados al resto del sistema fuera de la cámara de ensayo, utilizando como base un tablón que fue adaptado sobre uno de los perfiles que soportan el túnel de viento, observable en la Fig. 76. El uso de este elemento fue necesario debido a que los cables extendidos aún carecían del largo suficiente para instalar el resto del sistema de control sobre la mesa que se encuentra junto al túnel de viento.



Figura 76: Tablón que se adaptó al túnel de viento para utilizar como base para los elementos electrónicos.

7.3.3 Ensayos Preliminares de Funcionamiento

Como se mencionó con anterioridad, se realizaron dos ensayos preliminares a modo de verificar el correcto funcionamiento del sistema de medición y de la adquisición de datos. A continuación, se presenta la descripción detallada de los ensayos realizados, los objetivos planteados para cada ensayo, las consideraciones y ajustes realizados, y los resultados obtenidos.

7.3.3.1 Ensayo preliminar de adquisición de datos

Descripción del ensayo

Al ser la primera prueba realizada, el ensayo se concibió como un instrumento calibrar el sistema de recopilación de datos. Para ello, se propuso realizar una prueba a velocidad constante indeterminada, con la probeta sin flectar y con ángulo de ataque 0°. Los datos fueron recopilados una vez iniciado y desarrollado el flujo de viento en el túnel y se mantuvo el registro por alrededor de dos minutos.

Objetivos

- Determinar si el sistema de medición es capaz de captar variaciones en la presión en los puntos de lectura al enfrentarse el perfil a un flujo estacionario, efectivamente comprobando la sensibilidad de los instrumentos de medición.
- Comprobar la capacidad del sistema de adquisición de datos para recopilar y almacenar la información de manera continua y determinar si éste cuenta con estabilidad para funcionar por periodos prolongados sin fallar.

Consideraciones y ajustes

Si bien tras la primera instalación de los sensores en el manto los seis sensores adquiridos se encontraban en funcionamiento, tras instalar la probeta en el túnel de viento se notó que uno de los sensores del manto superior no registraba información y se asumió que sus conexiones se habían cortado. Debido a esto, se modificó el código del recopilador para funcionar con cinco sensores y se continuó con la prueba, pues no era posible realizar una reparación rápida y el tiempo de uso del túnel de viento era limitado a causa de que existía otro memorista que necesitaba usarlo.

Tras una primera instancia en el que se realizó la prueba, se notó que el sensor conectado al puerto 2 del multiplexor registraba presiones que estaban por sobre el promedio de los demás sensores por aproximadamente unos 4000 [Pa]. Se decidió compensar dicha diferencia por medio del código, y se volvió a realizar el ensayo.

Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos en el experimento se muestran en la Fig. 77. En general, se comprueba el buen funcionamiento del recopilador de datos y la sensibilidad de los sensores.

Ensayo con Flujo Estacionario

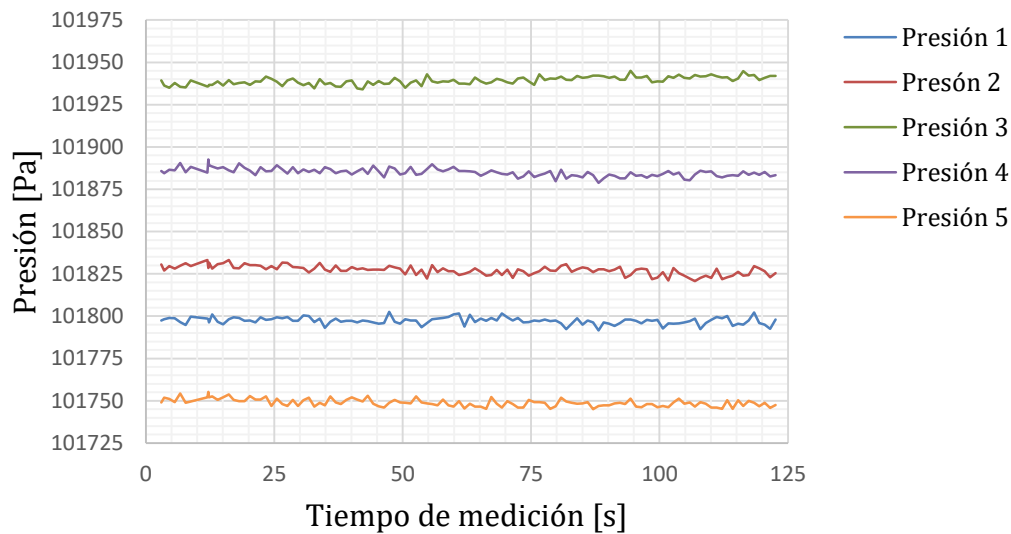


Figura 77: Resultados del ensayo con flujo estacionario sobre el perfil simétrico sin ángulo de ataque.

7.3.3.2 Ensayo preliminar de variación de presión

Descripción del ensayo

Para el segundo ensayo, se sometió el perfil a condiciones de viento a velocidad constante de 10 [m/s] y 20 [m/s], ambas para el perfil simétrico y para el perfil completamente flectado hacia abajo. Durante las mediciones a 10 [m/s], se varió el ángulo de ataque del perfil desde 0° a 25°, mientras que en las mediciones a 20 [m/s] se varió el ángulo de ataque desde 0° a 20° debido a las fuertes vibraciones que se producían debido a la velocidad. En ambos casos, se hicieron variaciones de 5° cada 50 segundos aproximadamente, lo que resultó en cuatro conjuntos de datos.

Objetivos

- Determinar si el sistema de medición cuenta con la sensibilidad para registrar las variaciones de presión en los puntos de lectura de manera consistente con la teoría.
- Comprobar los efectos que tiene la flexión del perfil alar en las presiones que se desarrollan sobre el manto.
- Determinar si las variaciones de presión observadas poseen una magnitud suficiente para considerarse una entrada valiosa para el sistema de control.

Consideraciones y ajustes

Este segundo ensayo preliminar fue realizado pocos días después del antes descrito, lo que no dio tiempo de reconectar el sensor cuyas conexiones se cortaron, pues para ello era necesario dismantelar la probeta y extraer por completo los sensores de éste. Cabe destacarse que, de los cinco sensores funcionales, los tres primeros corresponden a sensores que se encuentran en la parte superior del prototipo, mientras que los dos restantes pertenecen al manto inferior.

Debido a que la prueba se debía realizar para el perfil simétrico y para el perfil totalmente flectado hacia abajo, se optó por realizar las mediciones del perfil simétrico a las dos velocidades en primera instancia, para luego flectar el perfil directamente alimentando el motor y realizar las dos pruebas faltantes. Esto se debe principalmente a que no existía un código que implementara tanto la adquisición de datos como la posición del eje de la probeta en un solo programa en ese momento.

Además de los datos que fueron recolectados automáticamente por el adquirente de datos, se tomó nota de los tiempos en que comenzó la medición para cada ángulo de ataque, en conjunto con las mediciones de fuerza de sustentación y de arrastre mostradas por el equipo del túnel de viento. Si bien estos últimos datos no son 100% confiables, son útiles como referencia a la hora de identificar cuando el perfil entra en pérdida de carga.

Resultados obtenidos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las cuatro pruebas, primero los ensayos a 10 [m/s] y luego los a 20 [m/s]. Las Figuras 78–81, muestran la presión registrada por los cinco sensores en función del tiempo, mientras que las Tablas 12–15 detallan, respectivamente, los tiempos en que se varió el ángulo de ataque y las correspondientes lecturas de fuerza de sustentación y arrastre.

Perfil Simétrico, $V = 10$ [m/s], $\alpha = [0^\circ\text{-}25^\circ]$

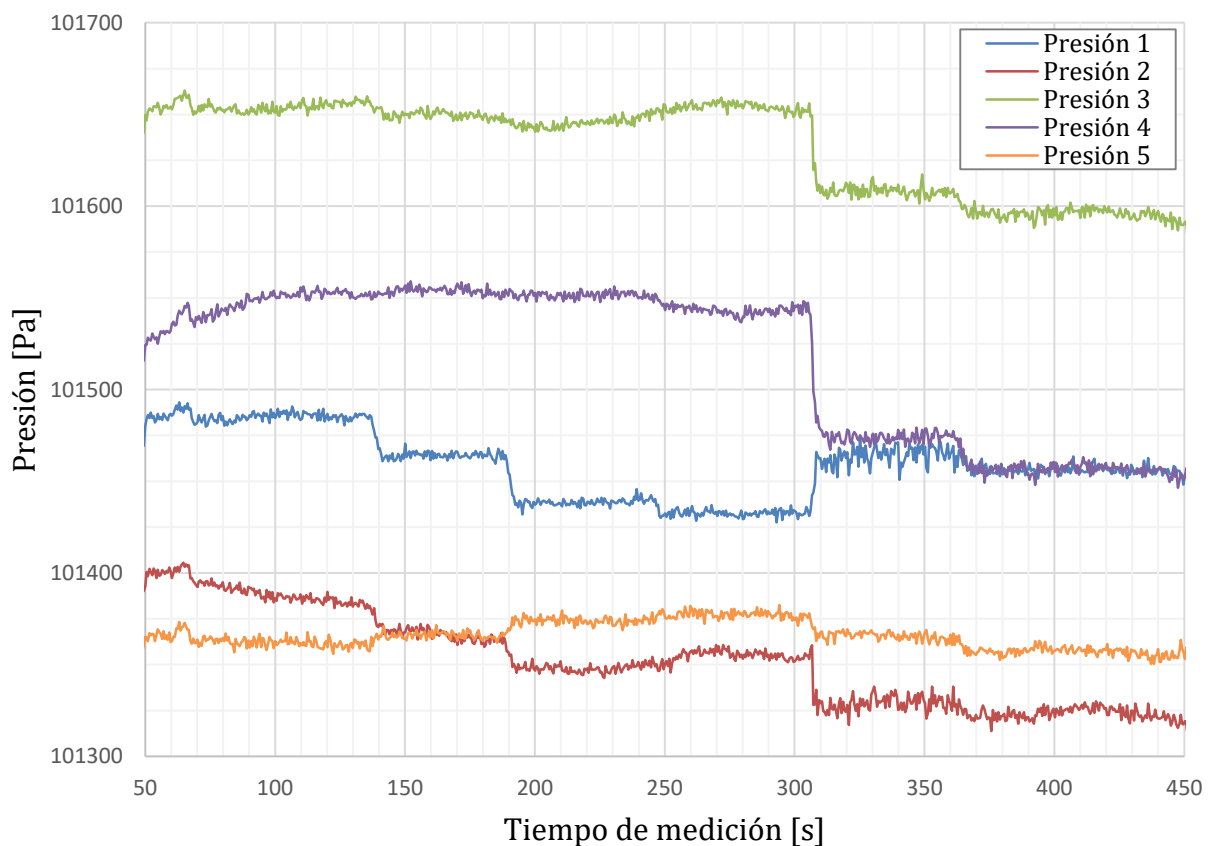
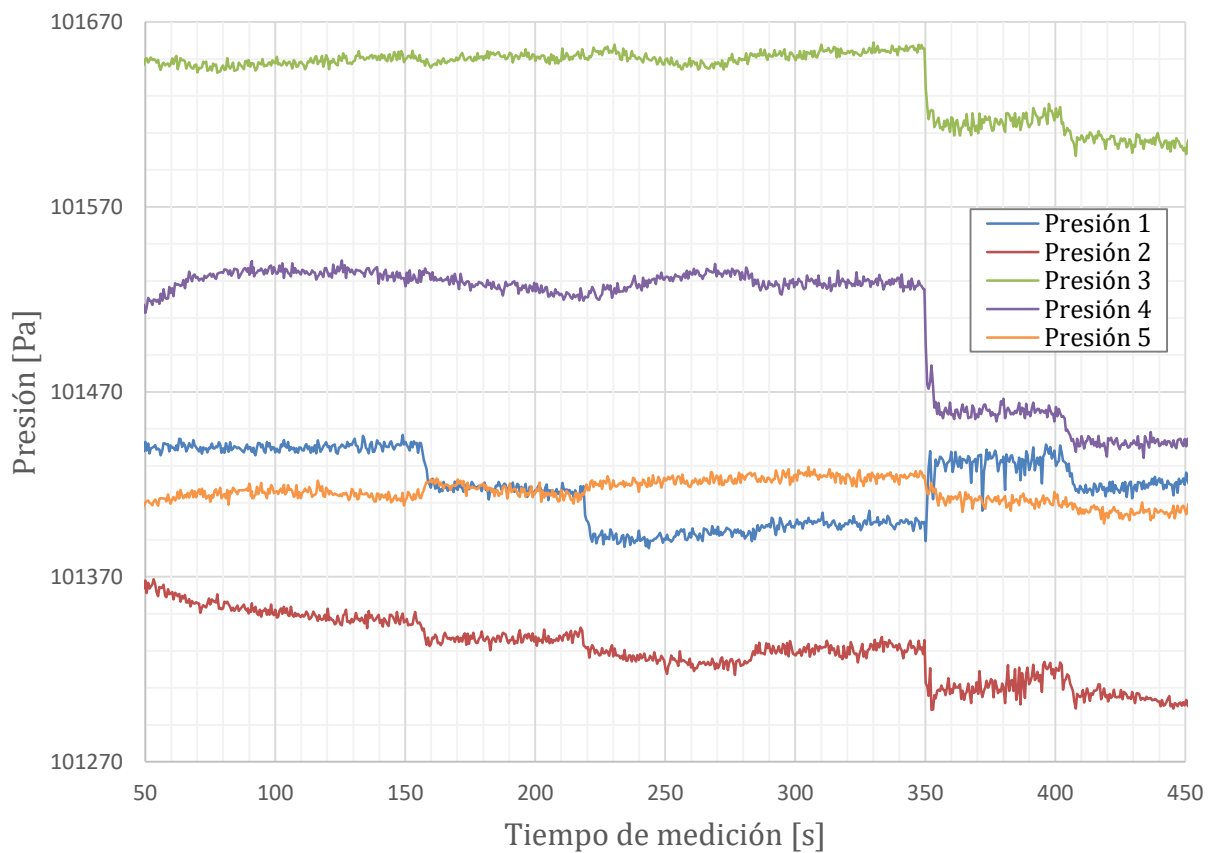


Figura 78: Prueba de perfil simétrico a 10 [m/s]. Presión registrada por los sensores sobre el manto al variar el ángulo de ataque entre 0° y 25° , con variaciones de 5° en intervalos regulares.

Tabla 12: Prueba de perfil simétrico a 10 [m/s]. Registro de tiempos para cada cambio de ángulo de ataque. Incluye lecturas de sustentación y arrastre obtenidos desde el túnel.

α	T [s]	Fuerza de Sustentación [kgf]	Fuerza de Arrastre [kgf]
0°	80	0.06	0.01
5°	140	0.2	0.06
10°	195	0.33	0.08
15°	250	0.41	0.09
20°	310	0.3 – 0.5	0.18
25°	370	0.3 – 0.5	0.25

Perfil Combado, $V = 10$ [m/s], $\alpha = [0^\circ - 25^\circ]$ **Figura 79:** Prueba de perfil combado a 10 [m/s]. Presión registrada por los sensores sobre el manto al variar el ángulo de ataque entre 0° y 25°, con variaciones de 5° en intervalos regulares.**Tabla 13:** Prueba de perfil combado a 10 [m/s]. Registro de tiempos para cada cambio de ángulo de ataque. Incluye lecturas de sustentación y arrastre obtenidos desde el túnel.

α	T [s]	Fuerza de Sustentación [kgf]	Fuerza de Arrastre [kgf]
0°	90	0.24	0.06
5°	160	0.36	0.07
10°	220	0.46	0.1
15°	290	0.50	0.11
20°	350	0.4 – 0.5	0.21
25°	410	0.5 – 0.6	0.32

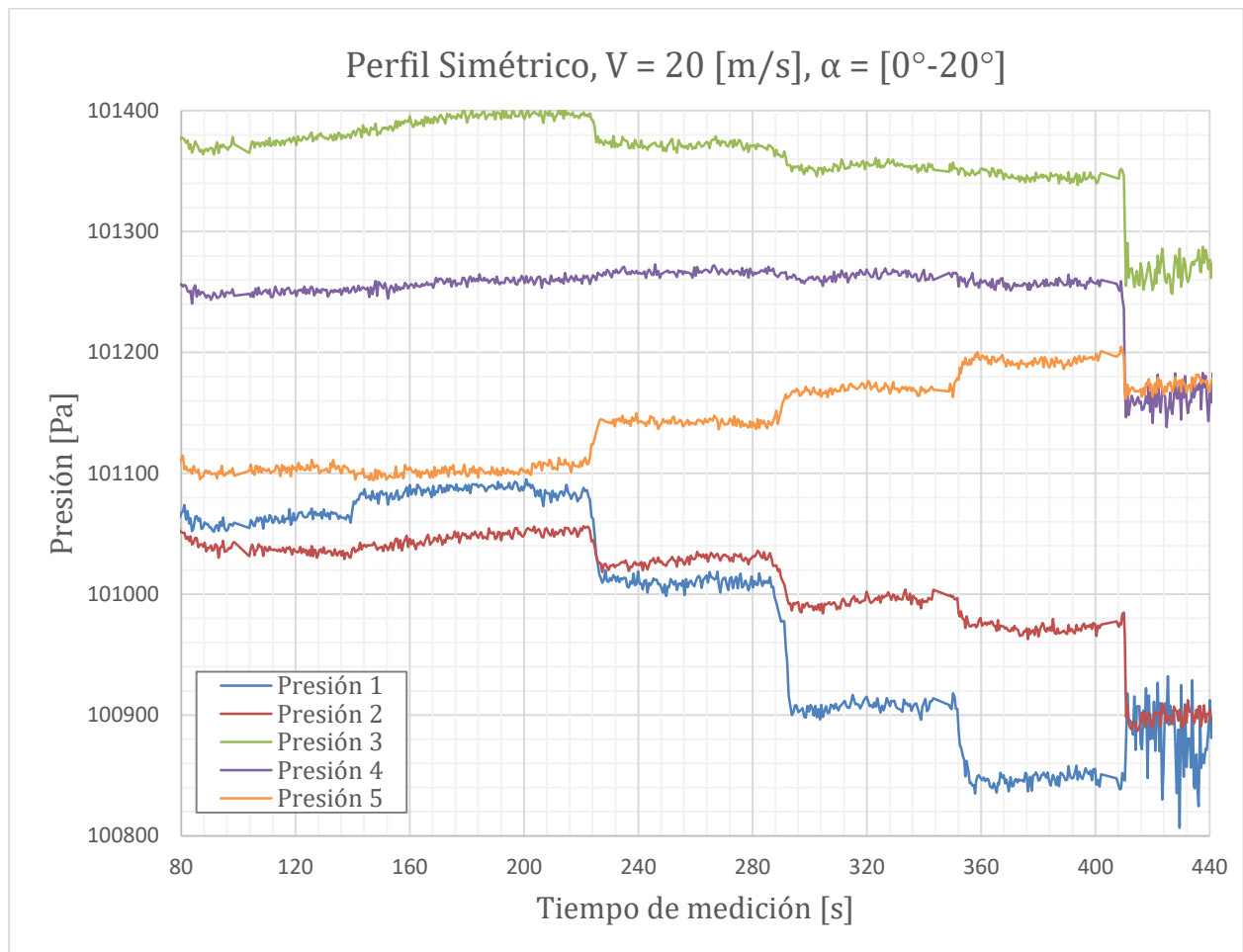


Figura 80: Prueba de perfil simétrico a 20[m/s]. Presión registrada por los sensores sobre el manto al variar el ángulo de ataque entre 0° y 20° , con variaciones de 5° en intervalos regulares

Tabla 14: Prueba de perfil simétrico a 20 [m/s]. Registro de tiempos para cada cambio de ángulo de ataque. Incluye lecturas de sustentación y arrastre obtenidos desde el túnel.

α	T [s]	Fuerza de Sustentación [kgf]	Fuerza de Arrastre [kgf]
0°	113	0.2	0.15
5°	230	0.6	0.15
10°	290	1.1	0.17
15°	350	1.5 – 1.6	0.20
20°	410	1.5 – 1.7	0.40

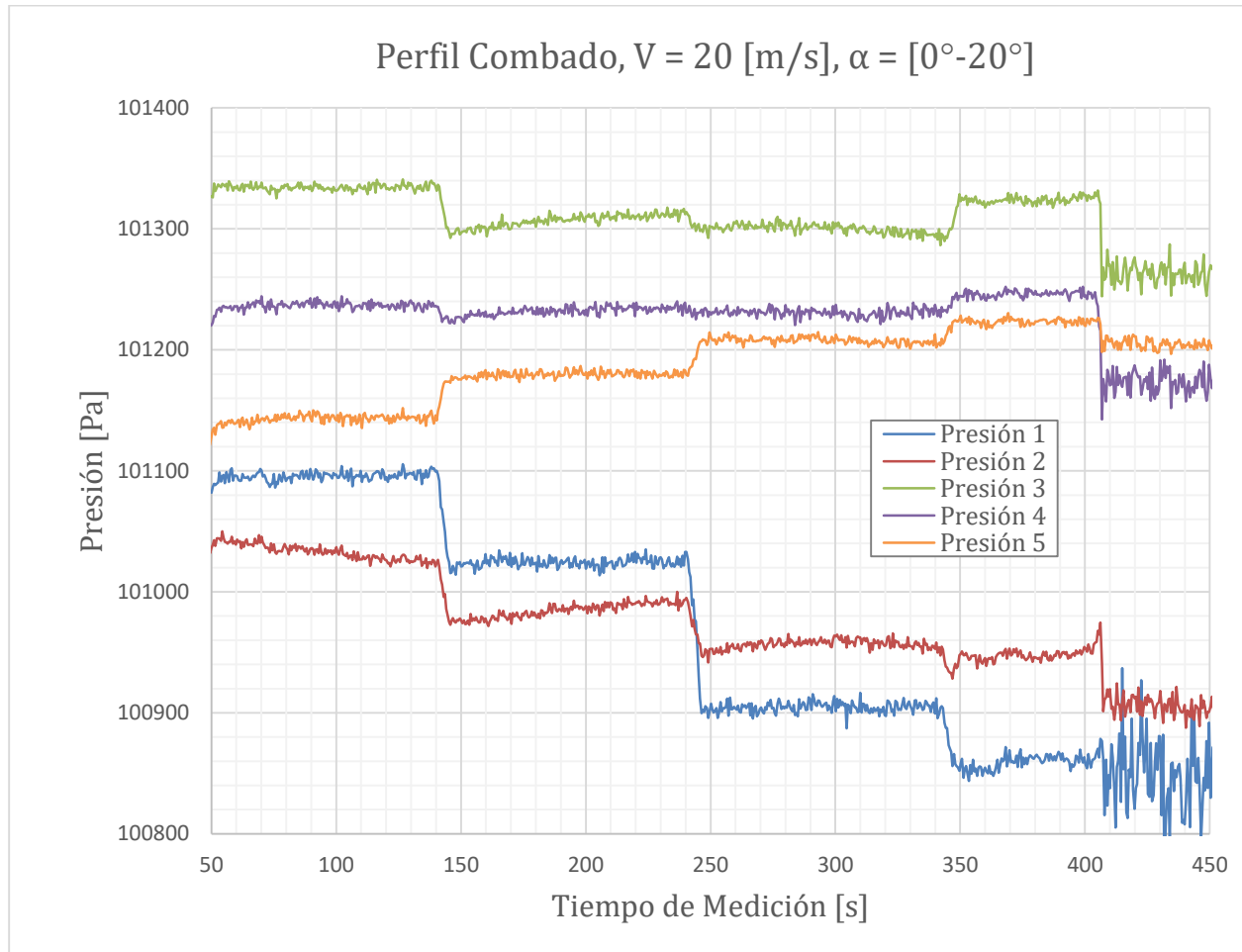


Figura 81: Prueba de perfil combado a 20 [m/s]. Presión registrada por los sensores sobre el manto al variar el ángulo de ataque entre 0° y 20° , con variaciones de 5° en intervalos regulares.

Tabla 15: Prueba de perfil combado a 20 [m/s]. Registro de tiempos para cada cambio de ángulo de ataque. Incluye lecturas de sustentación y arrastre obtenidos desde el túnel.

α	T [s]	Fuerza de Sustentación [kgf]	Fuerza de Arrastre [kgf]
0°	80	0.18	0.15
5°	140	1.20	0.15
10°	240	1.65	0.19
15°	340	1.80	0.27
20°	410	Oscilación fuerte	0.40

En general, los estudios realizados muestran notorios cambios en la presión al variarse el ángulo de ataque, además de poderse identificar la entrada en pérdida de carga tanto gráficamente como por medio de las lecturas de arrastre y sustentación.

7.3.4 Ensayo bajo Protocolo de Flexión

Habiendo confirmado el correcto funcionamiento del adquisidor de datos y del sistema de medición, además de comprobar que era posible registrar las fluctuaciones de presión puntuales en función del ángulo de ataque, se propone realizar un ensayo que nos permita recabar información sobre el efecto que tiene la flexión, en distintos grados, sobre el gradiente de presión que se desarrolla sobre el perfil alar.

7.3.4.1 Implementación de botonera para estados de flexión

Hasta el momento, no existía una forma de posicionar el eje de la probeta a modo de alcanzar puntos intermedios de flexión, lo que dificultaba la realización de pruebas que requiriesen de la medición del comportamiento a varios niveles de curvatura. En consecuencia, se implementó una botonera de cinco estados que permitió indicar al controlador el estado de flexión deseado y, en consecuencia, dirigir las acciones del módulo actuador.

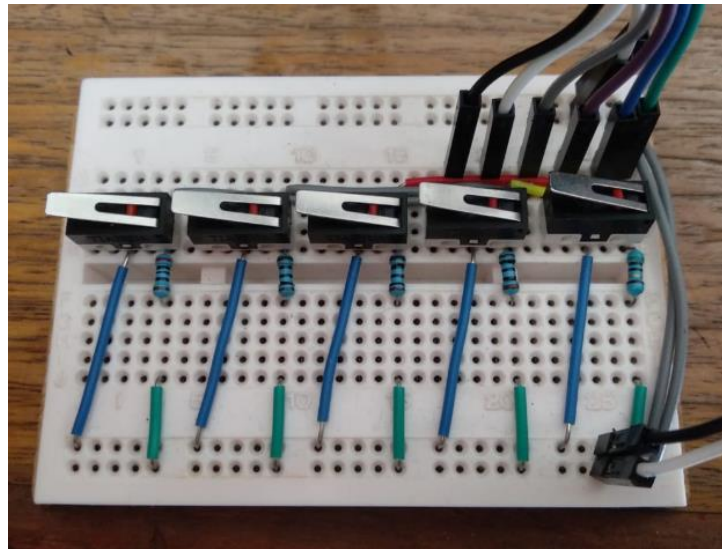


Figura 82: Botonera armada sobre una protoboard. Los cables en la esquina superior derecha conectan los interruptores a puertos digitales del Arduino, lo que permite que se identifique cuando son presionados.

La botonera fue construida por Gajardo^[2] y posteriormente modificada y codificada por mi parte. La modificación realizada se limitó a mover los cables de la conexión de los botones, observables en la Fig. 82, pues se encontraban conectados de manera normalmente-cerrado y, en consecuencia, todos los botones registraban pulsación. Por su parte, Gajardo^[2] implementó un código para captar cuando un botón fuese presionado y ese código fue introducido en el programa del módulo actuador, efectivamente logrando seleccionar un estado y relacionarlo a un ángulo de giro del motor. El código puede ser revisado en el Anexo 5.

Para hacer uso de este nuevo componente del sistema, se decidió utilizar un segundo controlador Arduino dedicado solamente al manejo del módulo actuador. Esto se debió principalmente a dos razones:

1. El sistema de adquisición de datos, aunque poderoso, no cuenta con buena estabilidad y se optó por dividir las tareas para evitar que la entrada de información por parte de los botones se viera retrasada por el registro de datos o generara un fallo en la recolección.
2. La botonera no es parte del diseño conceptual del sistema de control y, por lo tanto, se concibe como una herramienta para realizar los ensayos diseñados, por lo que su implementación no formará parte del sistema en su fase final.

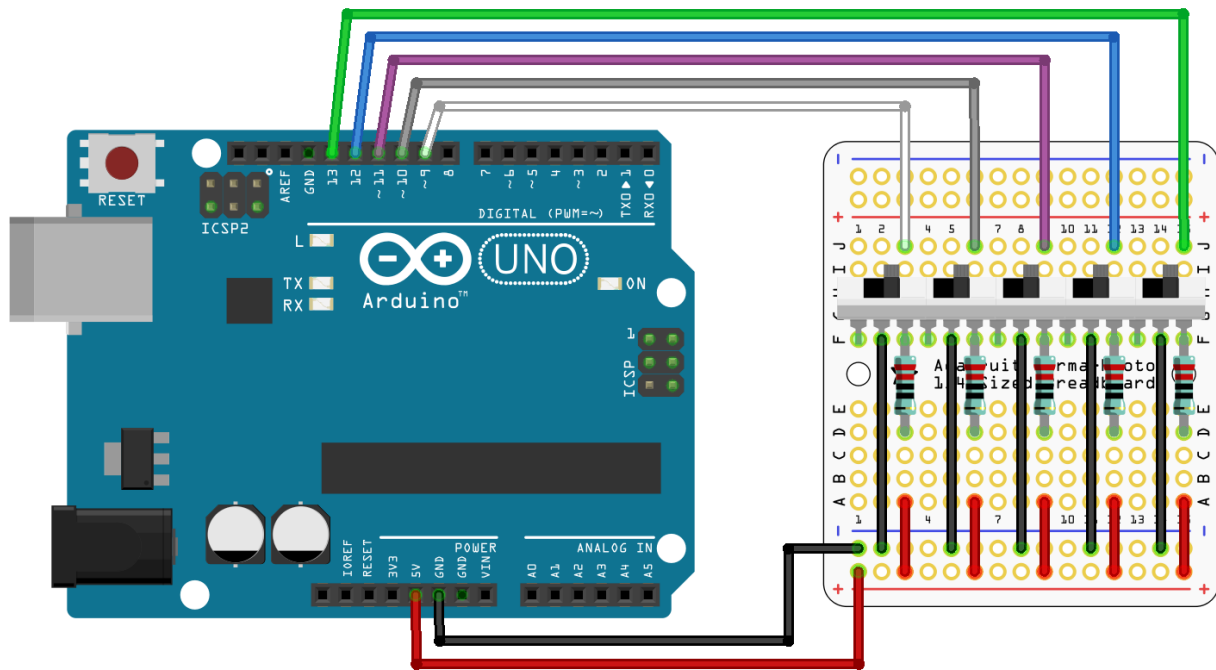


Figura 83: Diagrama de circuito de la botonera y su conexión con el controlador Arduino.

Ensamblaje y funcionamiento

Cada botón de la botonera, armada según el diagrama de la Fig. 83, fue conectado a uno de los puertos digitales 9 al 13 del Arduino, mientras que los puertos 5, 6 y 7 se utilizaron para comunicarse con el módulo actuador. Los puertos *interrupt 2 y 3* fueron utilizados por los cables de comunicación del *encoder*.

El programa utiliza cinco variables de estado asociadas a cada uno de los botones, los que al ser presionados cambian el valor de la variable. Luego, el código se encarga de verificar si el estado de alguna de esas variables corresponde a un botón presionado, preguntando en dos ocasiones con una diferencia de tiempo de 100 [ms]. De estar presionado, la posición que busca mantener el módulo actuador es cambiada a la que corresponde al estado a que esa variable representa y el motor realiza un giro para acomodarse en dicha posición.

Se determinó que las posiciones serían dos flexiones hacia arriba, dos hacia abajo y la posición neutra del perfil alar simétrico, como se observa en la Fig. 84. Los ángulos de giro asociados a cada estado fueron obtenidos por medio de ensayo y error, buscando lograr que las deflexiones fueran las máximas en ambos extremos y se reflejaran respecto al eje de simetría.

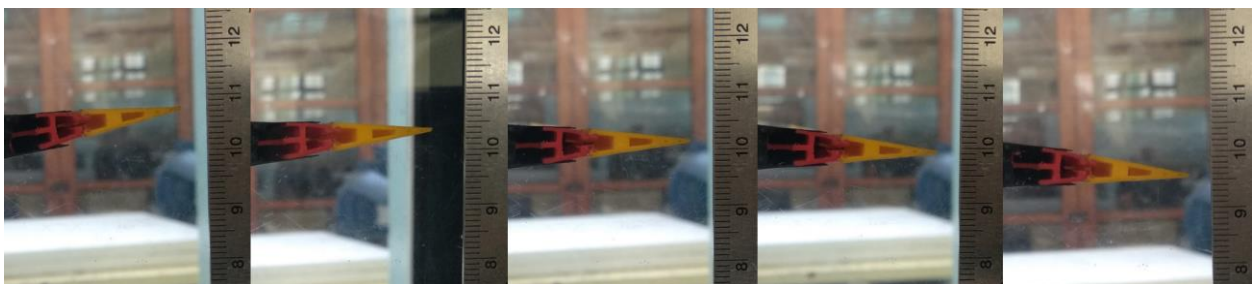


Figura 84: Posiciones de flexión durante el ajuste de la botonera. Desde la derecha, las posiciones son -2, -1, 0, 1 y 2.

Se denominó a cada posición con un número que indica hacia donde se flexa y en qué nivel. Desde la máxima deflexión hacia arriba hasta la máxima hacia abajo, los estados son -2, -1, 0, 1 y 2. Durante el ajuste de la botonera se ubicó el perfil alar en el túnel de viento en estado 0 y se adaptó una regla para medir las deflexiones ajustando el punto neutro en el 10. Luego, se condujo la probeta al estado -2 y se tomó nota de su posición respecto a la posición neutra, para luego pasar por todos los estados hasta el estado 2. Se notó que al volver a la posición 0 desde el -1, no se alcanzaba el punto 10.0, sino entre 10.1 y 10.2. Sin embargo, al pasar desde el estado 1 al 0, éste vuelve a marcar 10.0. Se atribuye la discrepancia a que existe juego del motor en el punto neutro, lo cual es audible al hacer funcionar la probeta.

Finalmente, teniendo en cuenta que los ensayos se realizarán con flexiones desde el estado -2 al 2, se decide utilizar las mediciones realizadas en ese orden para obtener los valores de las deflexiones correspondientes a cada estado. La Tabla 16, a continuación, muestra la distancia recta vertical entre el estado 0 y los demás estados. Cabe destacar que se consideraron negativas las flexiones hacia arriba y positivas las flexiones hacia abajo.

Tabla 16: *Distancia vertical desde el estado neutro para las cuatro flexiones asociadas a la botonera.*

Estado	Posición Referencial	Distancia Vertical
-2	10.8	6.5 [mm]
-1	10.4	2.5 [mm]
0	10.15	0.0 [mm]
1	9.9	2.5 [mm]
2	9.5	6.5 [mm]

7.3.4.2 Primer ensayo bajo protocolo de flexión

Habiendo conseguido una manera de manifestar distintos estados de flexión en la probeta, se procede a realizar el ensayo bajo protocolo de flexión detallado a continuación.

Descripción del ensayo

Durante el ensayo, se sometió el perfil alar a flujos de 5, 8 y 16 [m/s]. Para cada una de esas velocidades, se registraron lecturas de presión, arrastre y sustentación para los cinco estados de flexión de la probeta cuando ésta presentaba ángulos de ataque de 0°, 4°, 8°, 12°, 16° y 20°. Es decir, se recopilaron datos de 30 estados para tres velocidades, alcanzando un total de 90 estados de flujo distintos. Los datos fueron registrados simultáneamente por medio del adquisidor de datos de presión y manualmente por medio de las lecturas de las balanzas de arrastre y sustentación. Además, se registraron los tiempos en los cuales se realizaron los cambios de estado de flexión.

Objetivos

- Determinar el efecto que tienen los distintos estados de flexión en el gradiente de presión que se desarrolla sobre el perfil alar.
- Recolectar una base de datos comparable con simulaciones que permitan verificar la veracidad de los registros realizados y/o implementar un sistema de control basado en escenarios pre-programados.

- Corroborar la factibilidad de utilizar la lectura de los sensores como una entrada suficiente para desarrollar un sistema de control automático y robusto.

Consideraciones y ajustes

Inicialmente, se pretendía realizar todas las mediciones de una velocidad de flujo sin realizar pausas. Sin embargo, se notó que el adquisidor de datos fallaba luego de sobrepasar alrededor de 1000 segundos de registro, por lo que se comenzó desde cero recopilando datos individuales para cada ángulo de ataque frente a cada una de las tres velocidades de flujo. La información recabada por los sensores se recopiló en tres documentos distintos para cada velocidad de flujo. Cada uno de los documentos contiene una hoja de cálculo para cada ángulo de ataque, donde se encuentran los registros de los cinco sensores respecto al tiempo de medición. Los datos recopilados manualmente fueron escritos en un cuaderno y luego traspasados a una hoja de cálculo.

Los cambios de estado de flexión se realizaron, en su mayoría, cada 50 segundos, pues se consideró que ese tiempo era suficiente para que el flujo se desarrollara. Al iniciar el túnel de viento se regulaba la velocidad del flujo de aire, luego se ajustaba el ángulo de ataque y posteriormente se posicionaba el perfil alar en el estado de flexión -2. Pasado cierto tiempo, se encendía el adquisidor de datos y se realizaban las modificaciones de flexión en intervalos regulares.

Si bien en el ensayo anterior era posible representar las lecturas de todos los sensores en un mismo gráfico y observar las variaciones de presión originadas por el cambio de ángulo de ataque, esto no es reproducible con los datos de estas pruebas. Esto se debe a que las variaciones de presión provocadas por un cambio en el estado de flexión de la probeta no tienen la misma magnitud que los provocados por el cambio del ángulo de ataque y, en consecuencia, no se logra apreciar la variación de cada sensor al graficarlos en conjunto ya que la diferencia de medición base entre sensores es mucho mayor a dichas variaciones. Debido a esto, se optó por graficar el registro de cada sensor para cada ángulo de ataque, obteniéndose 18 gráficos por sensor, es decir, 90 gráficos en total.

Cabe destacar que, debido a la avería de un sensor, se trabajó con cinco sensores. Los sensores 1 al 4 se encuentran en el manto superior y el sensor 5 en el borde de salida inferior, como se ilustró en la Fig. 70.

Resultados obtenidos

A razón de lo anterior, se decide presentar sólo los resultados correspondientes a las mediciones realizadas con ángulos de ataque de 8° y 16° para cada una de las tres velocidades en las Figuras 85–90. Por su parte, la Tabla 17 entrega información de los tiempos de medición, fuerza de arrastre y fuerza de sustentación medidas para cada uno de los casos graficados.

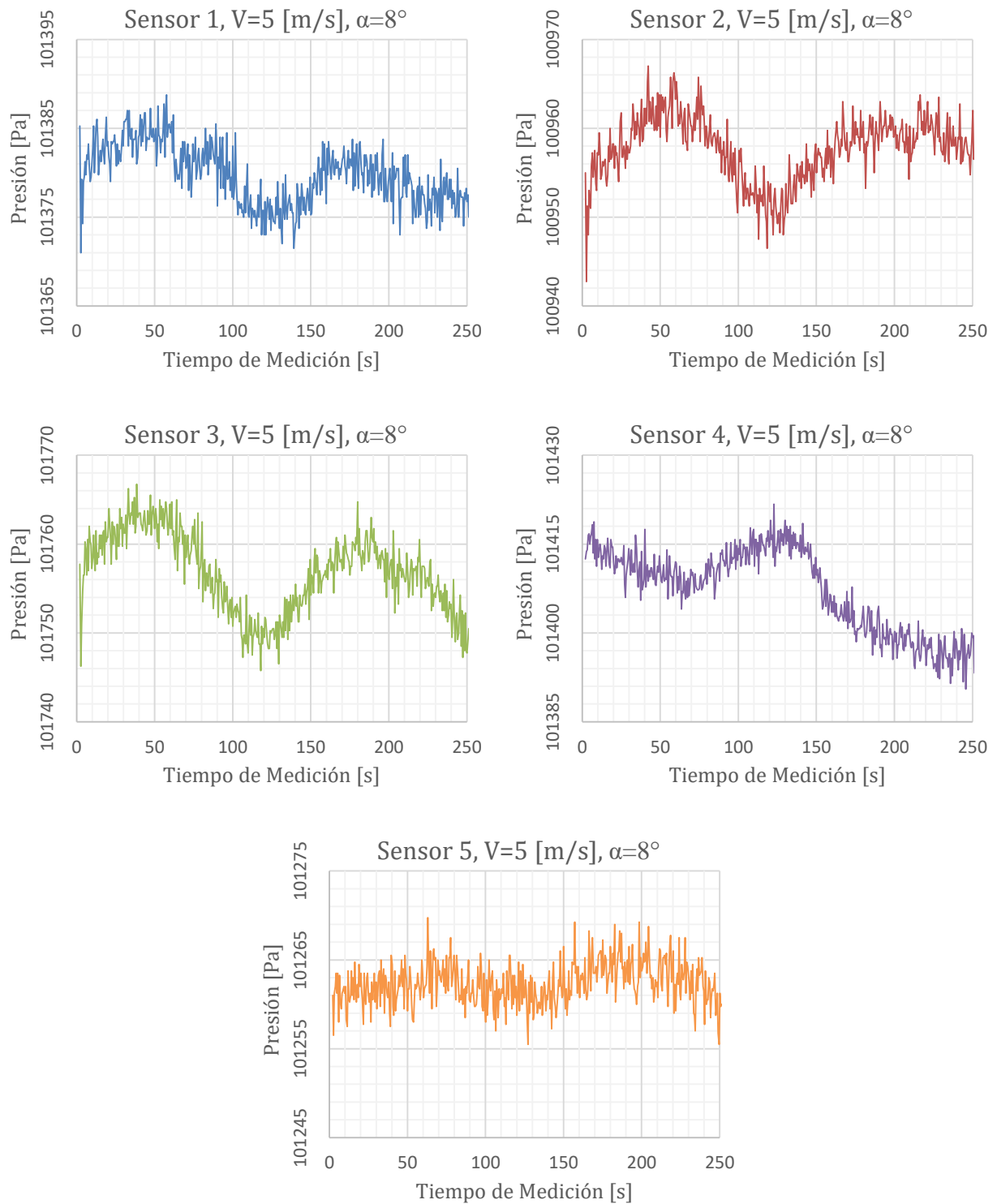


Figura 85: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 5 [m/s] con un ángulo de ataque de 8° .

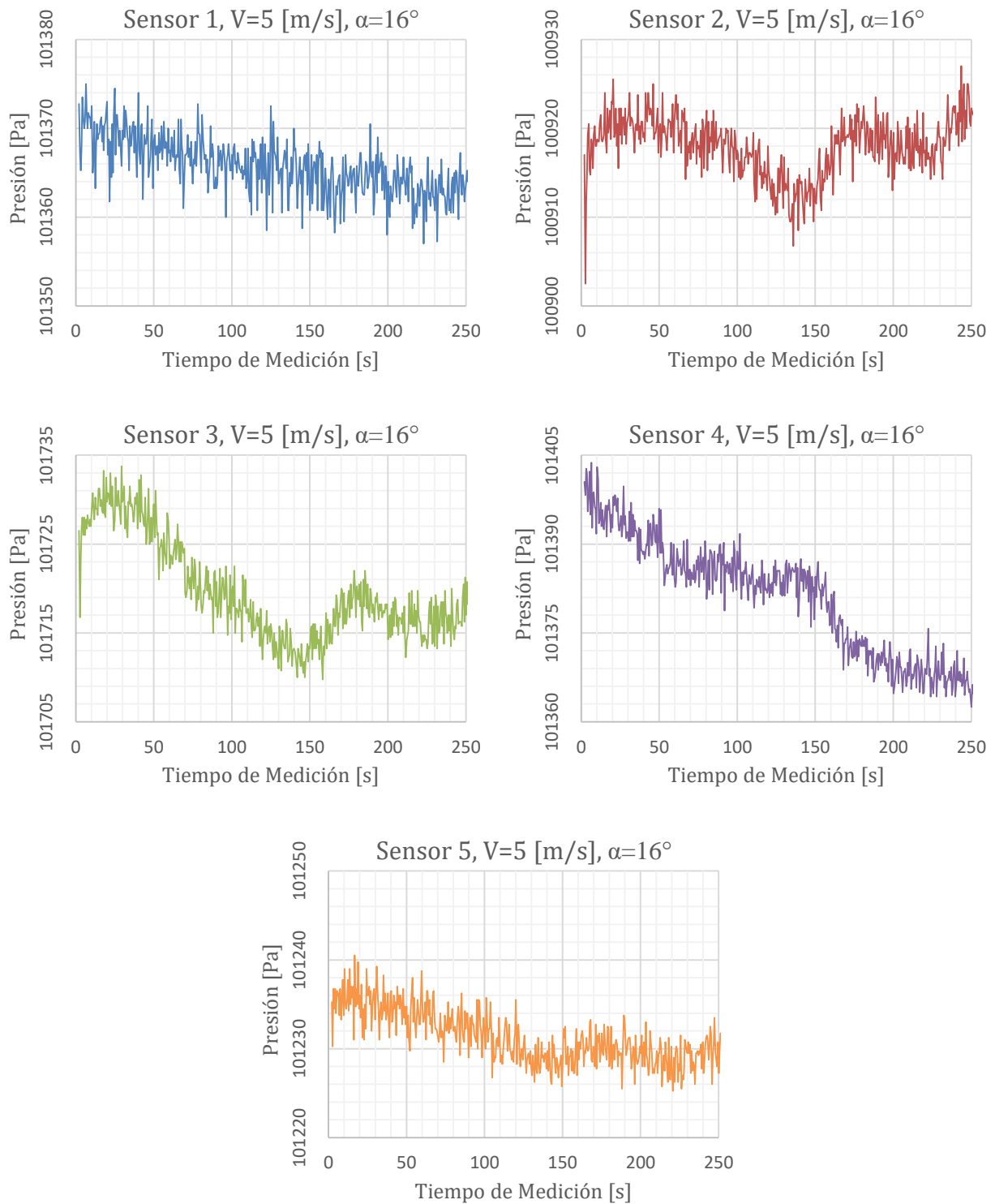


Figura 86: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 5 [m/s] con un ángulo de ataque de 16° .

En general, de las pruebas a 5 [m/s] se observa que para $\alpha=8^\circ$, ángulo menor al ángulo crítico, tanto la flexión negativa como positiva resultan en un aumento en la presión sobre el manto superior, como lo muestran los sensores 1 al 3. Esto no se condice con la teoría, que predice un comportamiento más cercano al que muestra el sensor 4. Para $\alpha=16^\circ$, ángulo mayor al ángulo crítico, se observa un comportamiento un poco más cercano a la teoría por parte de los sensores del manto superior. La información se contrastará con los datos de la Tabla 17.

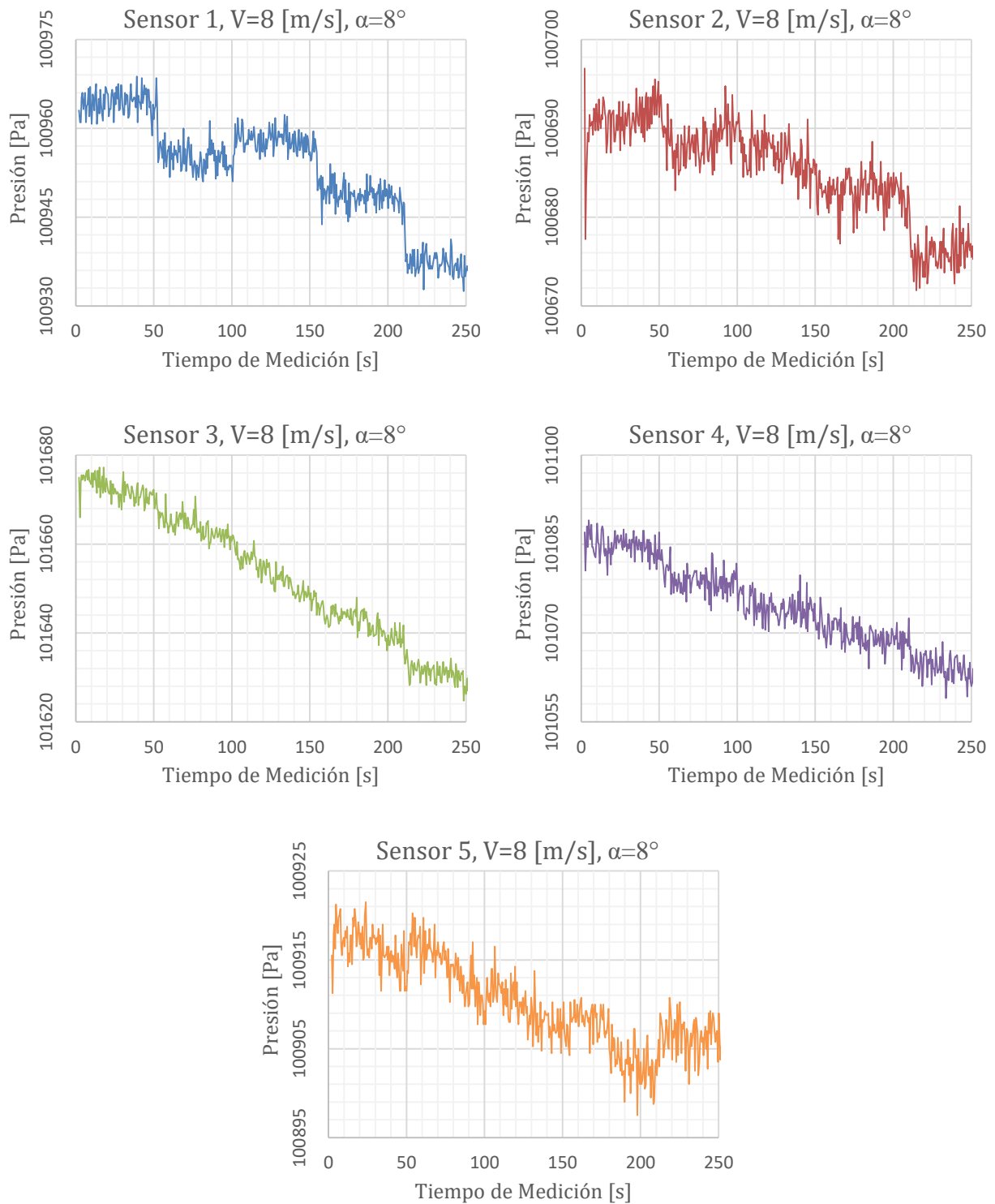


Figura 87: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 8 [m/s] con un ángulo de ataque de 8° .

Las mediciones a 8 [m/s] y $\alpha=8^\circ$, mostraron un comportamiento más cercano a lo deseado en el manto superior. El sensor 5, por su parte, registró una disminución de presión al presentarse flexiones positivas, contrario a lo que se esperaba al curvarse hacia abajo el aparato.

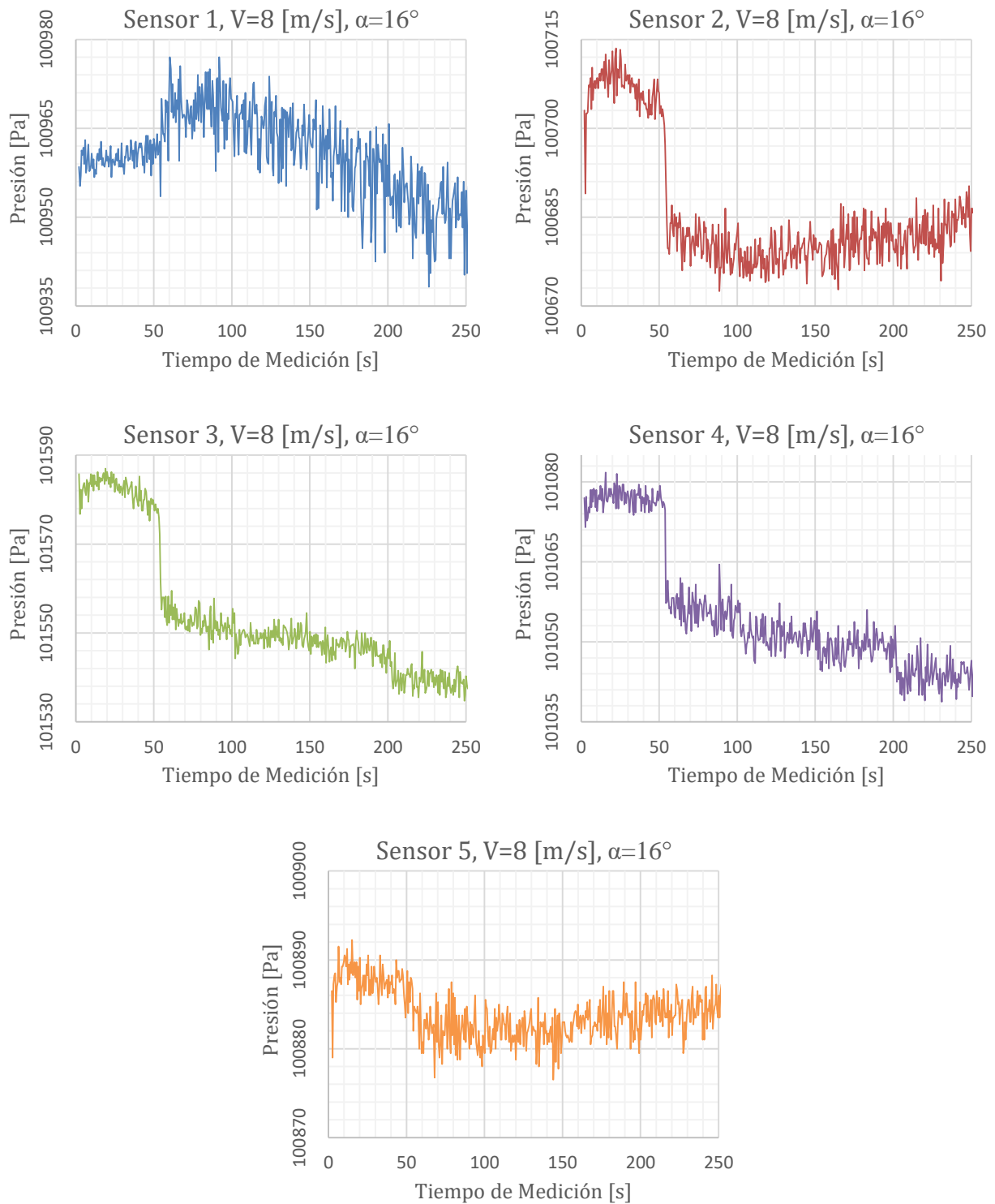


Figura 88: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 8 [m/s] con un ángulo de ataque de 16°.

En general, para $\alpha=16^\circ$, se observa que el sensor 1, en el borde de ataque, registró oscilaciones del doble de amplitud que durante la prueba a 5 [m/s]. Además, se observa una gran baja en la presión leída por los tres sensores del manto superior al pasar del estado -2 al estado -1.

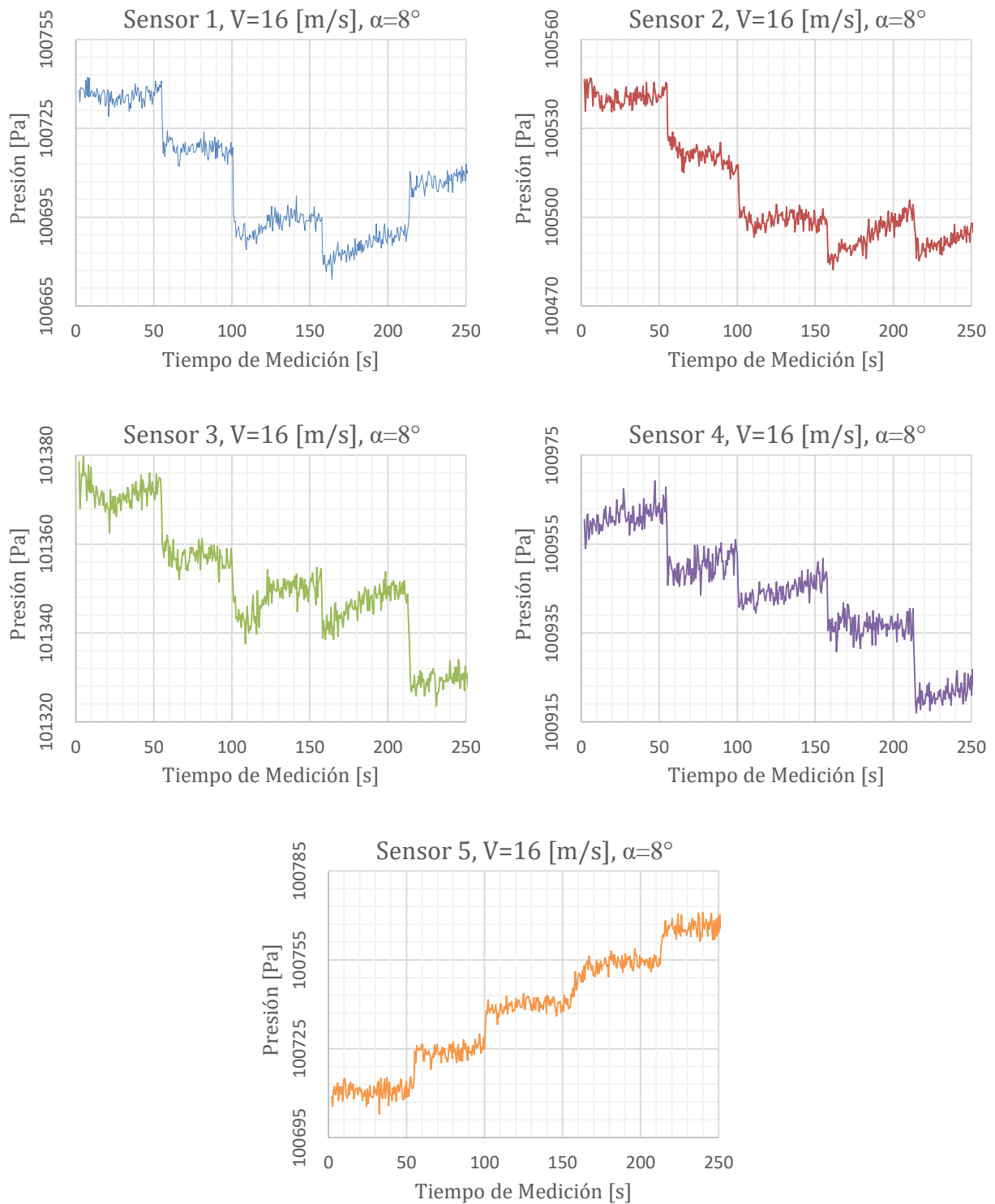


Figura 89: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 16 [m/s] con un ángulo de ataque de 8° .

Las lecturas de los sensores al enfrentarse a un flujo de 16 [m/s] con un $\alpha=8^\circ$ muestran un comportamiento muy cercano a lo que se espera según teoría. La continua flexión hacia estados positivos genera una baja de presión sobre el manto superior, mientras que el sensor inferior registra un aumento. Esto debiese indicar un aumento en la sustentación sin un gran aumento en el arrastre, como se comprobará posteriormente en la Tabla 17.

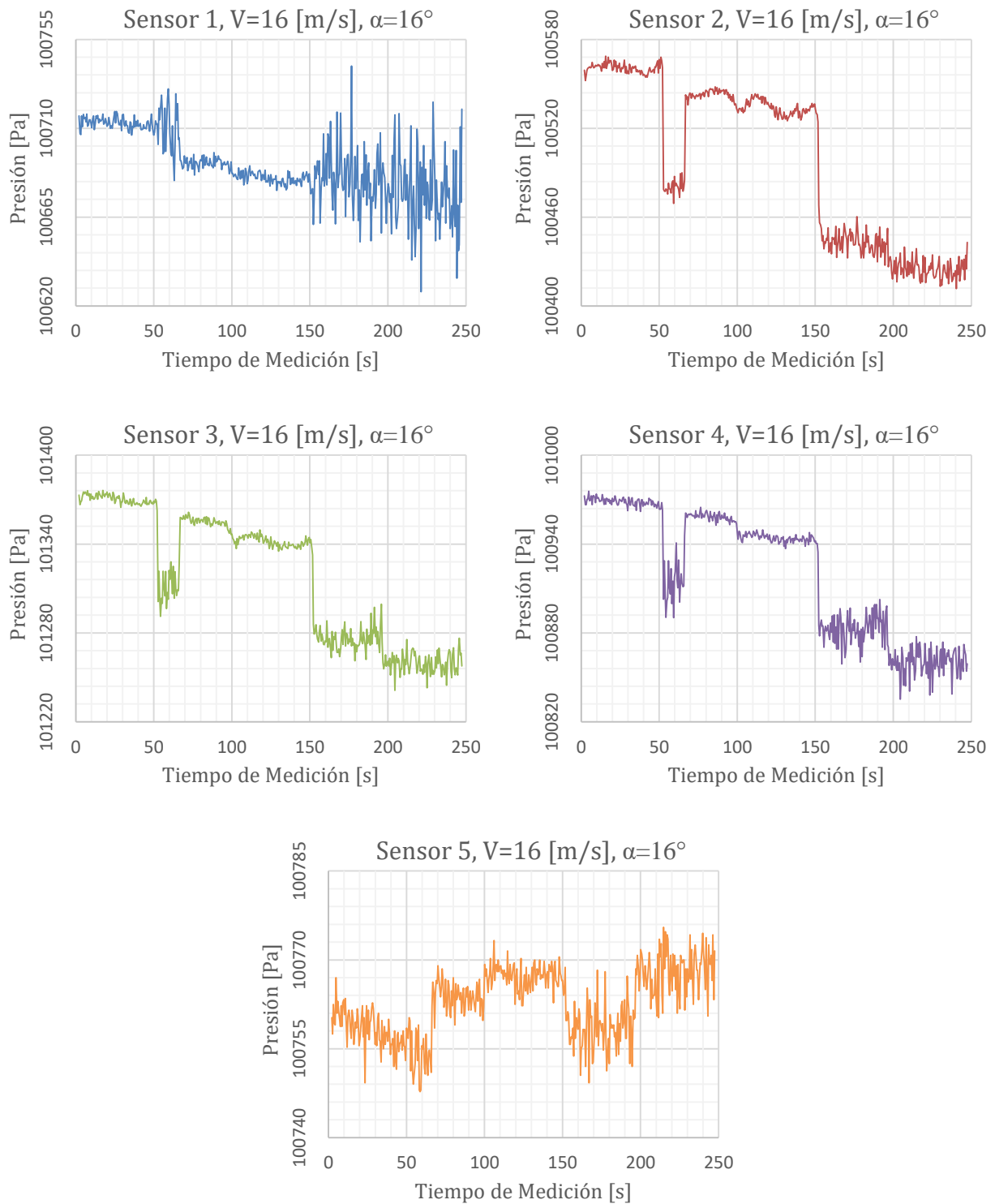


Figura 90: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 16 [m/s] con un ángulo de ataque de 16° .

Debido a la alta velocidad y a mantener un ángulo de ataque superior al crítico, las pruebas a 16 [m/s] con $\alpha=16^\circ$ muestran grandes oscilaciones en la presión medida y saltos notorios al ocurrir un cambio de estado de flexión.

A continuación, se presenta la Tabla 17 que contiene el registro de los tiempos de inicio de cada estado de flexión, además de las fuerzas de arrastre y sustentación entregadas por el túnel de viento. Como se mencionó anteriormente, si bien estas mediciones de fuerza no son

del todo confiables su permite tener una idea del estado aerodinámico que presenta la probeta para cada estado ensayado.

Tabla 17: Tiempo de inicio de los estados de flexión, lecturas de arrastre y sustentación registradas por las balanzas del túnel de viento para los ensayos a 5, 8 y 16 [m/s] con ángulos de ataque de 8° y 16°. Los valores de sustentación que indican rangos representan el registro de una fuerte oscilación entre esos puntos.

Velocidad [m/s]	Ángulo de ataque [°]	Posición de Flexión [-]	Tiempo de inicio [s]	Sustentación [kgf]	Arrastre [kgf]
5 [m/s]	8°	-2	2	0.04	0.02
		-1	62	0.06	0.02
		0	104	0.08	0.02
		1	156	0.10	0.02
		2	196	0.12	0.02
5 [m/s]	16°	-2	2	0.06 – 0.10	0.03
		-1	54	0.10 – 0.12	0.04
		0	102	0.10 – 0.12	0.04
		1	158	0.10 – 0.14	0.05
		2	200	0.12 – 0.16	0.05
8 [m/s]	8°	-2	2	0.08	0.03
		-1	52	0.12	0.03
		0	102	0.16	0.03
		1	154	0.18	0.03
		2	210	0.24	0.03
8 [m/s]	16°	-2	2	0.2	0.05
		-1	54	0.18 – 0.28	0.07
		0	101	0.20 – 0.30	0.08
		1	153	0.20 – 0.30	0.09
		2	200	0.26 – 0.34	0.11
16 [m/s]	8°	-2	2	0.32	0.08
		-1	55	0.50	0.08
		0	100	0.64	0.08
		1	158	0.74	0.08
		2	210	0.84	0.09
16 [m/s]	16°	-2	2	0.80 – 0.86	0.11
		-1	52	0.80 – 1.00	0.13
		0	100	1.00 – 1.60	0.13
		1	152	0.96 – 1.20	0.27
		2	197	0.94 – 1.50	0.30

Al contrastar la información entregada por los gráficos con la recopilada de las balanzas, se concluye que los registros de los ensayos a 16 [m/s] se condicen con los estados representados por las fuerzas en las tablas. Sin embargo, no se considera que las mediciones a 5 [m/s] se reflejen con los registros de fuerza de sustentación. Por último, si bien lo reflejado por los gráficos de las pruebas a 8 [m/s] se asimila bastante al contenido de la Tabla 17, se considera que pueden existir algunos errores en la medición que no permiten tener seguridad de ello.

7.3.4.3 Segundo ensayo bajo protocolo de flexión

A consecuencia de los resultados obtenidos durante el primer ensayo realizado utilizando el protocolo de estados de flexión, se decidió repetir las pruebas a 5 [m/s] y 8 [m/s] a modo de corroborar la veracidad de los datos recopilados. En el caso del ensayo a 5 [m/s], se espera que nuevos resultados se reflejen de mejor manera con el estado aerodinámico leído en las balanzas del túnel. Mientras que para el ensayo de 8[m/s] se espera que se mantengan las mediciones que se condicen con la teoría y que las mediciones que suscitan dudas de la veracidad de los datos se ajusten al comportamiento descrito por las fuerzas de arrastre y sustentación.

Descripción del ensayo

Durante el ensayo, se sometió el perfil alar a flujos de 5 y 8[m/s]. Para cada una de esas velocidades, se registraron lecturas de presión, arrastre y sustentación para los cinco estados de flexión de la probeta cuando ésta presentaba ángulos de ataque de 0°, 4°, 8°, 12°, 16° y 20°.

Objetivos

- Validar el ensayo a 5 [m/s] recopilando un nuevo conjunto de datos que refleje la información recogida directamente de las balanzas de arrastre y sustentación.
- Verificar la veracidad del ensayo a 8 [m/s] consiguiendo datos que eliminen la información que hacía dudar de su validez con respecto al estado aerodinámico presentado por las lecturas del túnel de viento.

Consideraciones y ajustes

Si bien los resultados obtenidos durante la prueba a 16 [m/s] estuvieron dentro de lo esperado y lograron reflejar de buena manera lo registrado a través de las balanzas del túnel de viento, ésta no fue la única razón que se tuvo para no repetir el ensayo. Se considera que la velocidad de 16 [m/s] es muy alta en comparación con las velocidades medias a las que operan los dispositivos aerogeneradores y, en consecuencia, se decide sólo repetir las pruebas a 5 y 8 [m/s] pues su validez adquiere una mayor relevancia a la hora de elaborar un sistema de control para un perfil alar cuyo fin es integrar un modelo de generador eólico.

Otro punto importante a mencionar es que los resultados de este ensayo definirán el curso que el proyecto tomará. La capacidad del sistema para reproducir los resultados anteriores verificará que las mediciones son robustas y estables dentro de cierto rango, lo que validará el uso de estas mediciones como base para el sistema de control. Por otro lado, de no reflejarse el estado aerodinámico, como ocurrió en el primer ensayo a 5 [m/s], las mediciones no serán utilizables como insumo para el sistema y habrá que buscar alternativas.

Resultados obtenidos

A continuación, se presentan en las Figuras 91–94. Los resultados obtenidos para las segundas pruebas realizadas a 5 [m/s] y 8 [m/s] para ángulos de ataque de 8° y 16°. Luego, se adjunta una tabla con los datos recogidos manualmente desde el túnel de viento y los tiempos de inicio para cada estado de flexión.

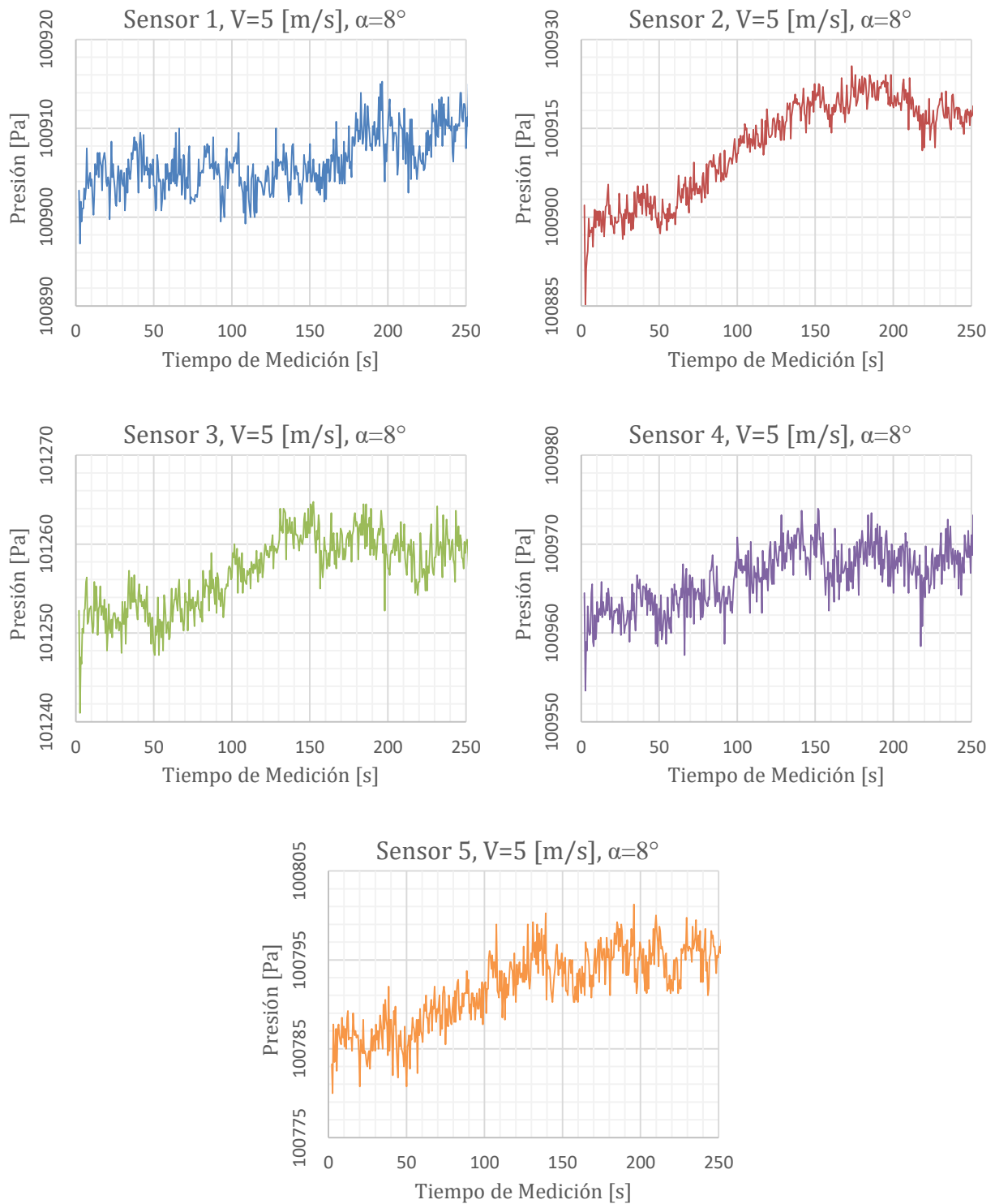


Figura 91: Segundo ensayo bajo protocolo de flexión. Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 5 [m/s] con un ángulo de ataque de 8° .

En general, se observa que las segundas pruebas a 5 [m/s] y $\alpha=8^\circ$ muestran resultados distintos al primer ensayo. El comportamiento de la presión es distinto para los estados -2 y -1, mientras que se mantiene para 0, 1 y 2. En términos de oscilación, se considera que éstas conservan una amplitud similar a las de la primera prueba. Por último, se nota que las mediciones de presión muestran, en todos los puntos, valores menores que en la primera iteración, tema que se tratará en detalle durante el análisis de resultados.

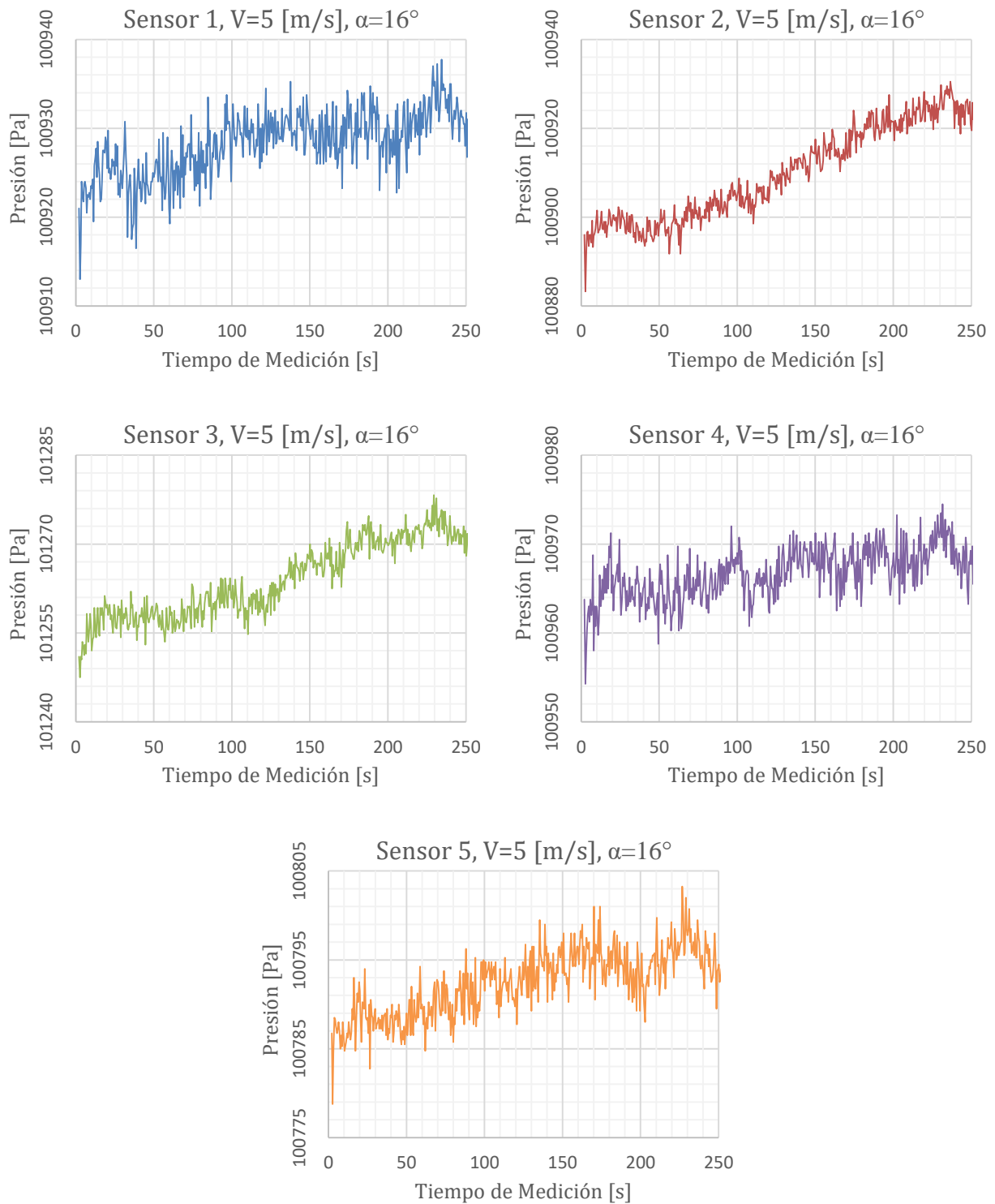


Figura 92: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 5 [m/s] con un ángulo de ataque de 16°.

En la mayoría de las mediciones de presión con $\alpha=16^\circ$ se observa un comportamiento contrario al registrado en el ensayo anterior. Se nota que existe un aumento de la presión al realizarse ajustes de curvatura, mientras que en la iteración anterior se observaba una disminución. Al igual que en el caso anterior, todos los puntos registran valores menores que en la primera prueba.

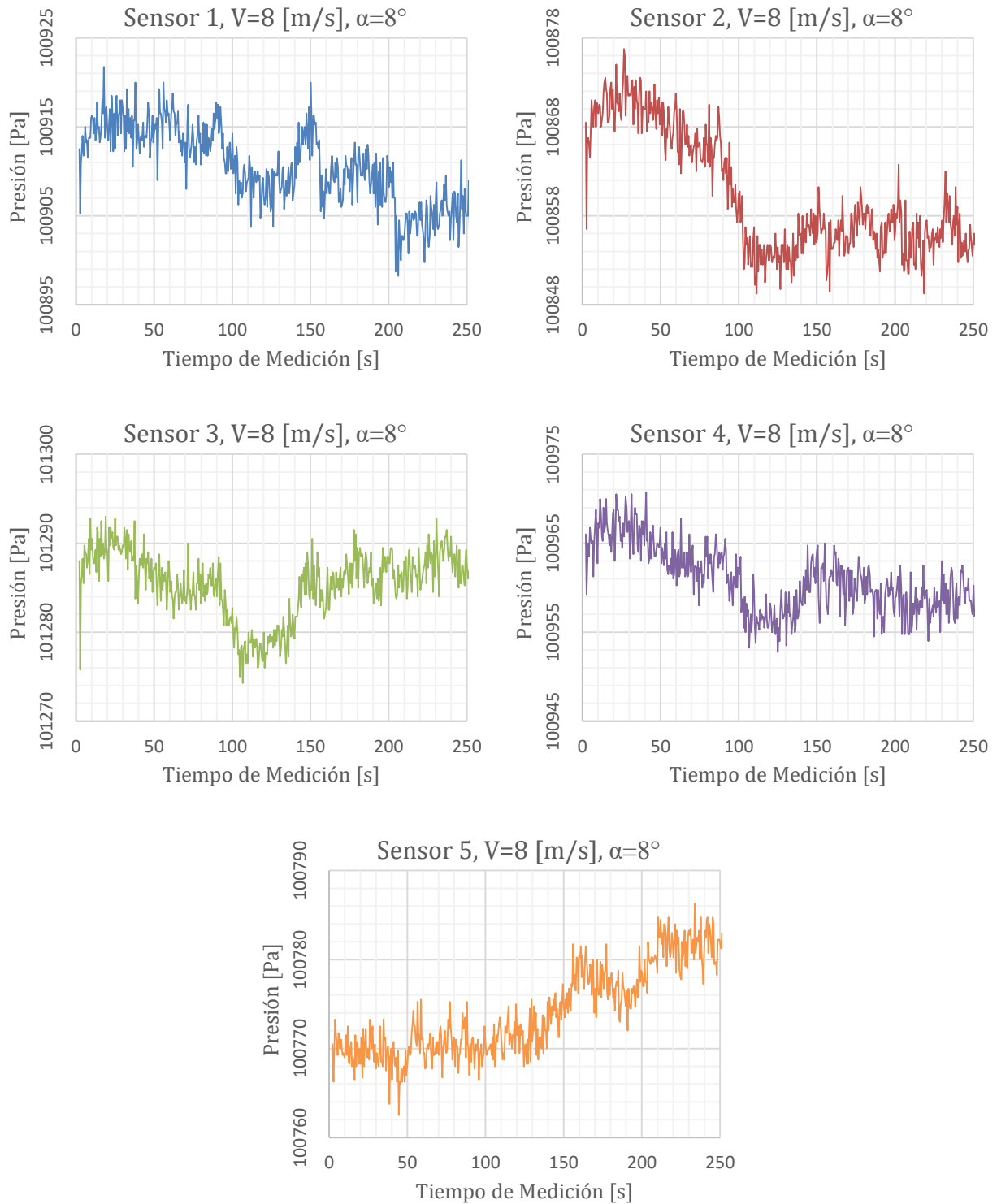


Figura 93: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 8 [m/s] con un ángulo de ataque de 8°.

En la segunda iteración de la prueba a 8 [m/s] y $\alpha=8^\circ$, los dos primeros sensores presentan un comportamiento escalonado mucho menos notorio que en la primera instancia que se realizó el ensayo. En el caso de los sensores 3 y 4 se observa que no existe un registro descendente continuo, sino que pasado el estado de flexión 0, se vuelve a presentar una subida de presión. El sensor del manto inferior presenta un comportamiento esperado. En general, los sensores tuvieron mediciones más bajas a las pruebas anteriores.

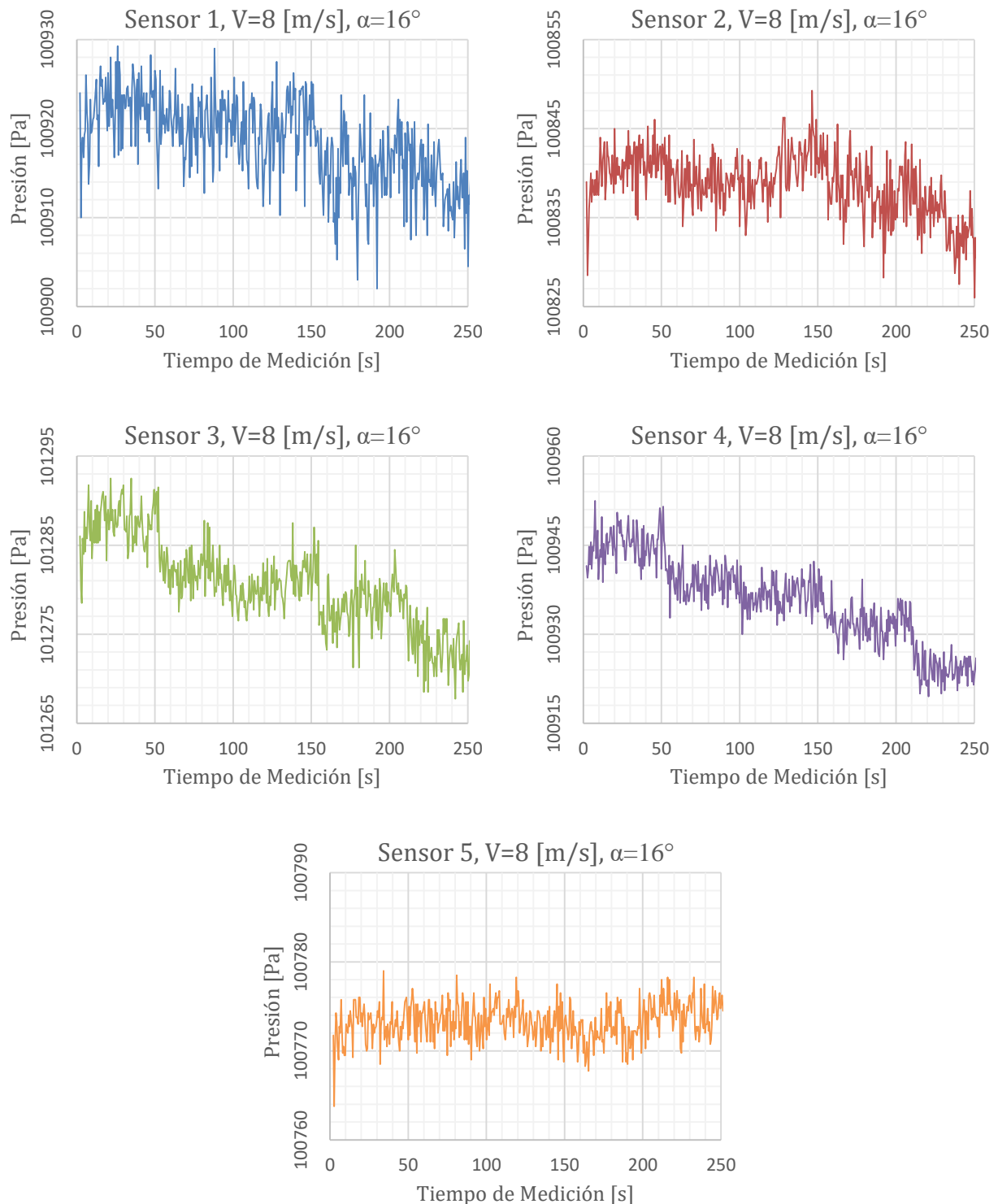


Figura 94: Variaciones de presión, por sensor, al enfrentar la probeta a un flujo a 8 [m/s] con un ángulo de ataque de 16° .

En las pruebas a 8 [m/s] y $\alpha=16^\circ$, las variaciones de presión registradas tienen una tendencia descendiente a medida que se ajusta la flexión, lo que se asemeja a las pruebas anteriores. Sin embargo, el estado de entrada en pérdida de carga se hace notorio debido al aumento en la amplitud de las oscilaciones. La diferencia más notoria de todas las mediciones ocurre para el estado de flexión -2, que antes presentaba una diferencia sustancial en la presión con respecto a los otros estados. Al igual que en los casos anteriores, las mediciones son menores.

Tabla 18: Tiempo de inicio de los estados de flexión, lecturas de arrastre y sustentación registradas por las balanzas del túnel de viento para los ensayos a 5 y 8 [m/s] con ángulos de ataque de 8° y 16°. Los valores de sustentación que indican rangos representan el registro de una fuerte oscilación entre esos puntos.

Velocidad [m/s]	Ángulo de ataque [°]	Posición de Flexión [-]	Tiempo de inicio [s]	Sustentación [kgf]	Arrastre [kgf]
5 [m/s]	8°	-2	2	0.06	0.02
		-1	53	0.06	0.02
		0	104	0.08	0.02
		1	155	0.10	0.02
		2	209	0.11	0.03
5 [m/s]	16°	-2	2	0.08 – 0.12	0.04
		-1	53	0.08 – 0.14	0.05
		0	101	0.10 – 0.14	0.05
		1	158	0.10 – 0.18	0.06
		2	208	0.10 – 0.20	0.06
8 [m/s]	8°	-2	2	0.12	0.03
		-1	52	0.16	0.03
		0	102	0.18	0.03
		1	156	0.22	0.04
		2	203	0.26	0.04
8 [m/s]	16°	-2	2	0.16 – 0.26	0.07
		-1	52	0.20 – 0.30	0.08
		0	102	0.20 – 0.30	0.09
		1	154	0.20 – 0.40	0.09
		2	211	0.20 – 0.40	0.11

A grandes rasgos, los datos de arrastre y sustentación recogidos de las balanzas mantienen los comportamientos antes observados. En algunos casos, se observa un aumento en las lecturas, pero se atribuye a una diferencia en el ajuste manual de las balanzas. De todas maneras, la descripción del estado aerodinámico se mantiene igual a la primera iteración.

Durante la siguiente sección se tratará a profundidad el análisis de los datos recogidos y las implicancias que esto tiene en el desarrollo del proyecto.

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la sección 8 se trató en profundidad el proceso mediante el cual se desarrolló un sistema capaz de realizar cambios en la curvatura de la probeta y de registrar la presión en puntos específicos del manto de la misma. Los resultados obtenidos pueden ser divididos en dos grupos según el análisis que se les puede dar:

1. Resultados de la implementación del sistema: Producto cualitativo del proceso construcción y habilitación del sistema electrónico.
2. Resultados de los ensayos de funcionamiento: Registro cuantitativo del funcionamiento del sistema y sus efectos sobre el fenómeno estudiado.

El carácter secuencial del trabajo realizado determinó que los resultados de la implementación fueran presentados y analizados durante el desarrollo del proyecto a modo de argumentar las acciones correctivas y mejoras realizadas en cada etapa de trabajo. Por su parte, los resultados de los ensayos que fueron presentados en la sección anterior corresponden a una parte de los datos recopilados y fueron analizados superficialmente.

En la presente sección se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos de los ensayos de funcionamiento. Para ello, se procesarán los datos recolectados a manera de elaborar nuevos resultados que permitan validar cuantitativamente el desempeño del sistema y verificar si es posible implementar un sistema de control automático para la probeta.

8.1 Análisis del Ensayo Preliminar de Recopilación de Datos

Cómo se mencionó con anterioridad, el primer ensayo buscaba comprobar el funcionamiento y estabilidad del recopilador de datos. Sin embargo, los datos recogidos del ensayo bajo condiciones de flujo estacionario nos sirven como base para observar la sensibilidad de los sensores ante fluctuaciones de presión de baja magnitud y para comparar la diferencia entre las mediciones de cada sensor.

8.1.1 Diferencia entre Sensores

Al observar la Fig. 77 en la sección 8.3.3.1 se puede notar que los registros de los sensores muestran comportamientos esperados: mediciones con una tendencia lineal con variaciones de baja amplitud. Sin embargo, también existe una diferencia en la medición base de los sensores, lo que es observable al comparar los promedios de las mediciones que se encuentran, a continuación, en la Tabla 19.

Tabla 19: Promedio de mediciones y desviación estándar por sensor para el ensayo preliminar de recopilación de datos.

Sensor	Promedio	Desviación Estándar
1	101797.26 [Pa]	±2.08 [Pa]
2	101827.15 [Pa]	±2.72 [Pa]
3	101939.20 [Pa]	±2.31 [Pa]
4	101884.97 [Pa]	±2.39 [Pa]
5	101748.87 [Pa]	± 2.22 [Pa]

Sin considerar que uno de los sensores fue ajustado previo al ensayo debido a que presentaba mediciones muy altas respecto a los demás, los valores promedio medidos varían hasta en 190 [Pa] si se comparan los casos extremos. Esto se mantiene dentro del rango de lo esperado pues el error absoluto nominal del sensor, entregado por el fabricante (Anexo 6), asciende a ± 400 [Pa].

8.1.2 Sensibilidad de los Sensores

Como primera confirmación de la sensibilidad de los sensores, se observa que los sensores registran fluctuaciones de baja intensidad al enfrentarse el prototipo a un flujo constante. Se atribuye dichas fluctuaciones al efecto que tienen las imperfecciones de la probeta sobre el desplazamiento del fluido sobre el manto. Esto último incluye los sensores, los cuales se encontraban inicialmente instalados de manera sobresaliente. La Tabla 19 también muestra las desviaciones estándar para los cinco sensores instalados en la probeta, mientras que, en las Fig. 95, a continuación, se presentan las mediciones de cada sensor por separado a modo de demostrar que dichas fluctuaciones no corresponden a una oscilación inherente al sistema electrónico.

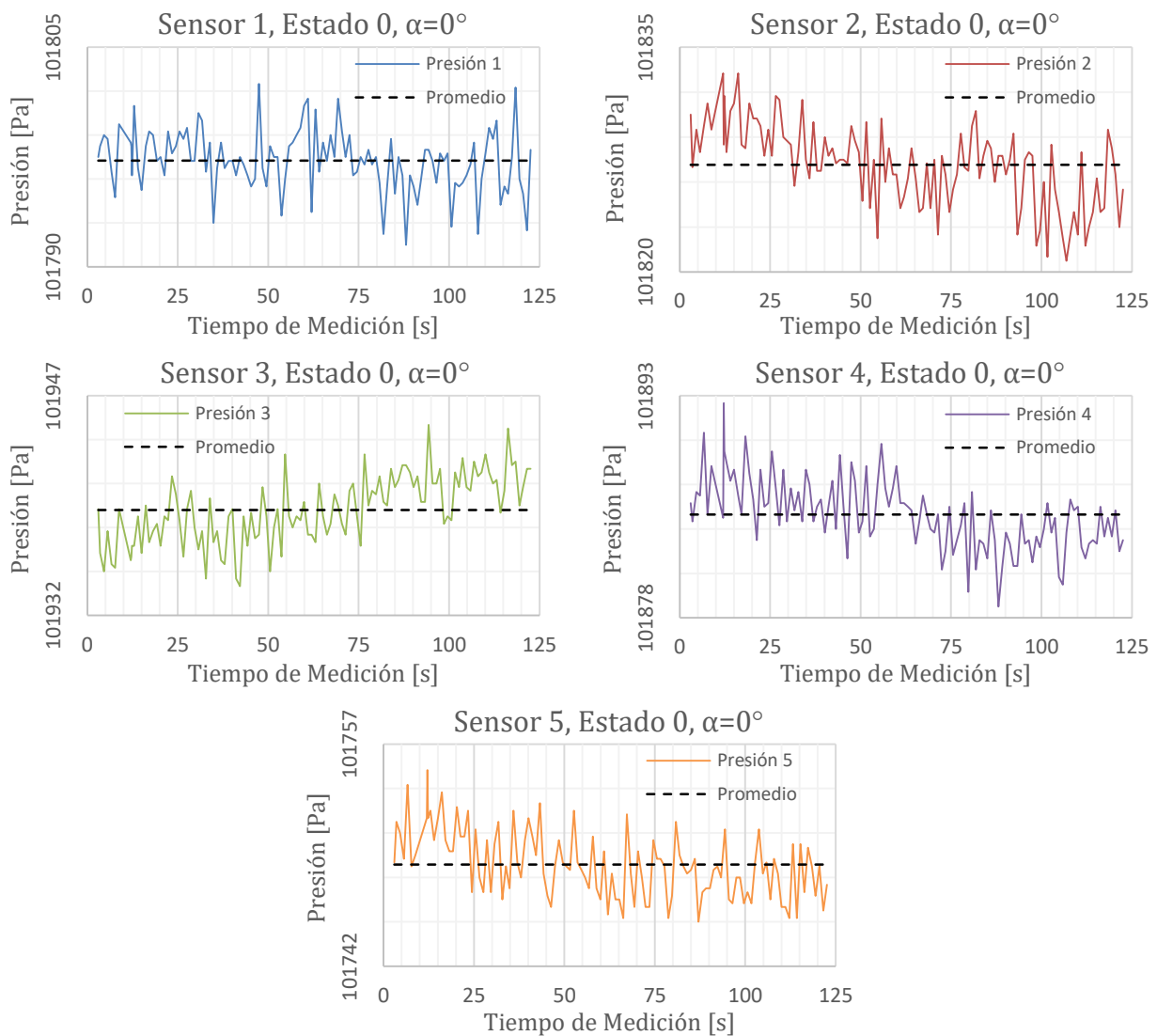


Figura 95: Mediciones individuales por sensor para ensayo preliminar de recolección de datos.

8.2 Análisis del Ensayo Preliminar de Variación de Presión

El segundo ensayo preliminar apuntaba a determinar si la sensibilidad del sistema era capaz de captar fluctuaciones en respuesta a cambios de curvatura y ángulo de ataque, para luego verificar qué tan apegadas eran las lecturas a la teoría. Las cuatro pruebas realizadas entregaron resultados que permiten comparar el efecto del cambio de curvatura de la probeta, además de verificar que existe registro de variaciones de presión en respuesta a los cambios de ángulo de ataque.

8.2.1 Comportamiento Escalonado ante Variación del Ángulo de Ataque

Como se esperaba, a medida que la probeta se enfrenta al flujo con un mayor ángulo de ataque, se observa que la presión sobre sus mantos superior e inferior varía. De esta manera, como se observa en las Figuras 96–98, los registros de los sensores del manto superior presentan una baja en la presión a medida que se aumenta el ángulo, mientras que los sensores de la parte inferior presentan un alza, lo que se refleja en un comportamiento escalonado que sólo se interrumpe al producirse una entrada en pérdida de sustentación por parte del prototipo.

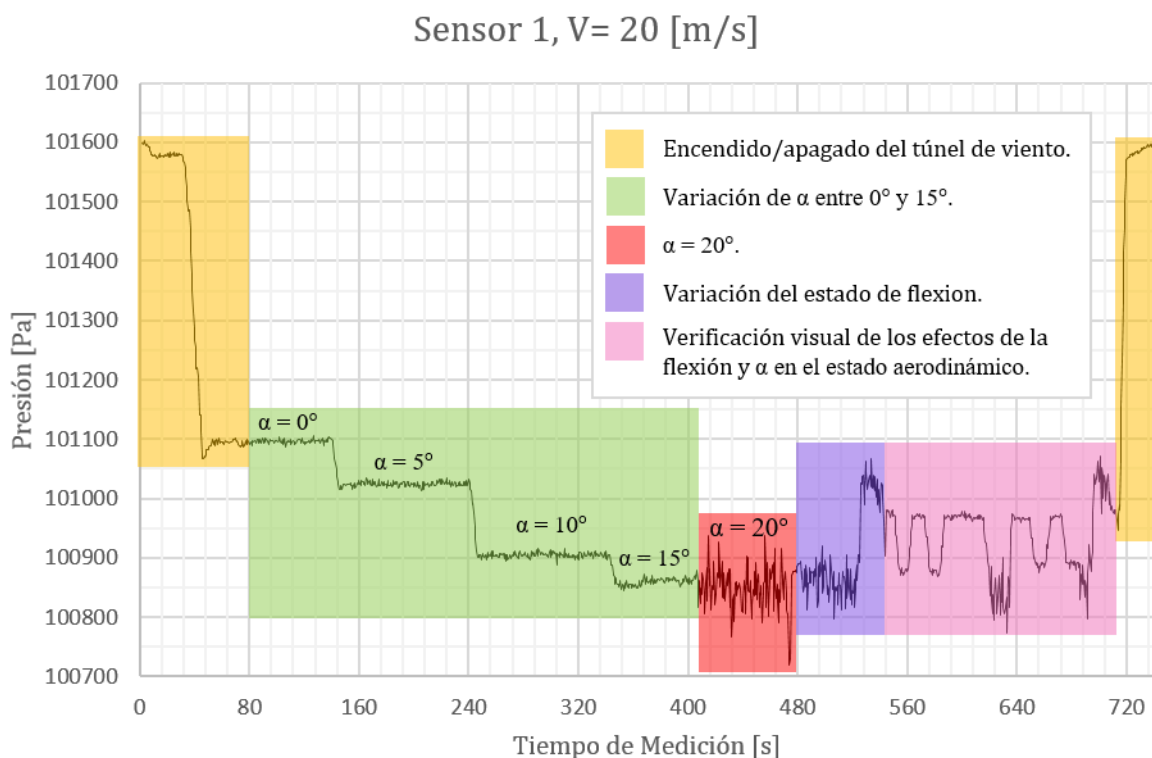


Figura 96: Presión en el borde de ataque sobre el manto superior. Se destacan zonas del espectro que proveen información relevante para el análisis.

Para ilustrar de mejor manera el efecto de las variaciones de ángulo de ataque se utilizaron los conjuntos de datos recopilados a 20 [m/s] ya que las fluctuaciones de presión generadas eran de una mayor magnitud. Las zonas en amarillo comprueban que el sistema reacciona a la velocidad del flujo, registrando una caída de presión de alrededor de 500 [Pa] al momento del encendido.

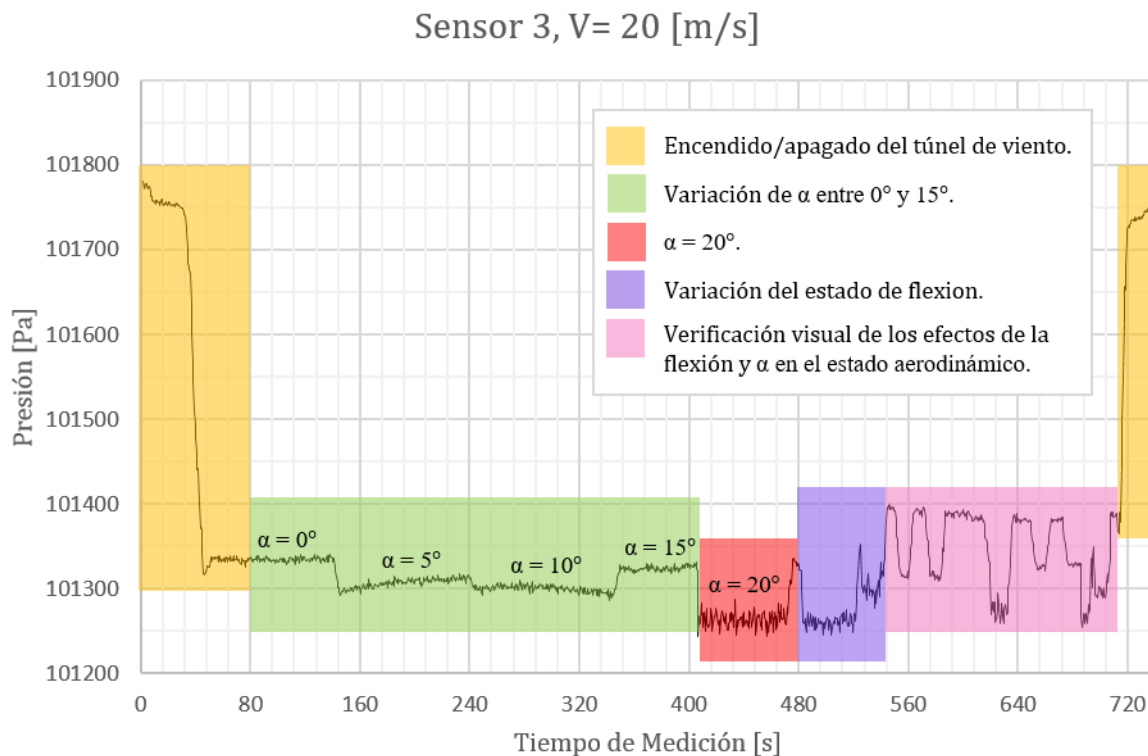


Figura 97: Presión en el borde de salida sobre el manto superior. Se destacan zonas del espectro que proveen información relevante para el análisis.

Si se analiza el comportamiento de los sensores 1 y 3 (Figuras 96 y 97) en la zona verde, se puede reconocer un comportamiento escalonado descendiente al aumentar el ángulo de ataque entre 0° y 10° . Sin embargo, la magnitud de las disminuciones de presión es menor en el borde de salida. Además, al ajustarse $\alpha=15^\circ$, el sensor 3 acusa una subida de presión, la cual se atribuye a que comienza a evidenciarse desprendimiento al superar el ángulo de ataque crítico. La Tabla 20, a continuación, verifica una disminución en la eficiencia aerodinámica al pasar desde $\alpha=10^\circ$ a $\alpha=15^\circ$.

Tabla 20: Eficiencia aerodinámica en función del ángulo de ataque para el ensayo a 20 [m/s] con estado de flexión 2.

α	F_L [kgf]	F_D [kgf]	C_L/C_D [-]
0°	0.18	0.15	1.2
5°	1.20	0.15	8.0
10°	1.65	0.19	8.7
15°	1.80	0.27	6.7

La zona destacada en rojo indica el ajuste del ángulo de ataque a 20° . El sensor 1 registra fluctuaciones de alta magnitud, mientras que los sensores 3 y 5 oscilan con menor intensidad. Por su parte, las zonas lavanda y rosa corresponden verificación visual del efecto del cambio de curvatura en la estabilidad del flujo sobre el prototipo, lo que permite comprobar que el cambio de curvatura oportuno puede retrasar o disminuir el desprendimiento de la capa límite del flujo sobre el prototipo.

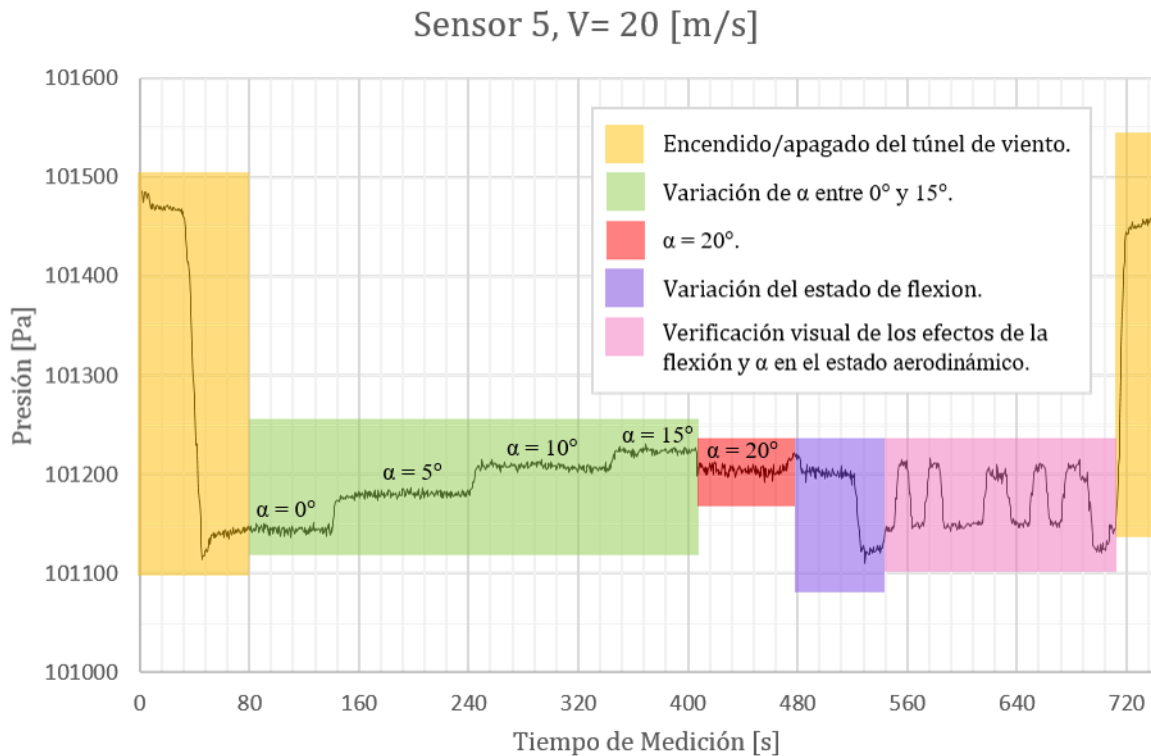


Figura 98: Presión en el borde de salida sobre el manto inferior. Se destacan zonas del espectro que proveen información relevante para el análisis.

Por último, la Fig. 98. presenta el comportamiento de la presión en el borde de salida inferior. Como se esperaba, la presión aumenta a medida que el ángulo de ataque sube. Cabe destacar que el sensor 4 (no presentado gráficamente en esta sección), mostró baja sensibilidad a los estados de flujo durante este ensayo. Esto se atribuyó a que los cables de comunicación y el anclaje bloqueaban el flujo y, en consecuencia, se trasladó el sensor desde su posición en el manto inferior hacia el manto superior donde ocurrió la falla de otro de los sensores.

8.2.2 Efecto del Estado de Flexión

Otro de los objetivos que tenía la realización del segundo ensayo preliminar era comprobar si el sistema era capaz de registrar el efecto del cambio de curvatura sobre el estado del flujo al que se enfrentaba el perfil. A falta de un sistema que controlara el estado de flexión, se realizó el ensayo sólo en dos posiciones: en estado simétrico y en completa flexión hacia abajo.

La Fig. 99 muestra una comparación de los resultados obtenidos utilizando el perfil en estado simétrico y completamente flectado hacia abajo. En general, se comprueba que el sistema es capaz de registrar las diferencias entre los dos estados de flexión, donde se observa un comportamiento similar entre los estados dentro de un mismo sensor. Es importante notar que existe un desplazamiento horizontal entre las curvas de cada estado producto de que las condiciones del flujo no fueron ajustadas en los mismos instantes de tiempo de medición.

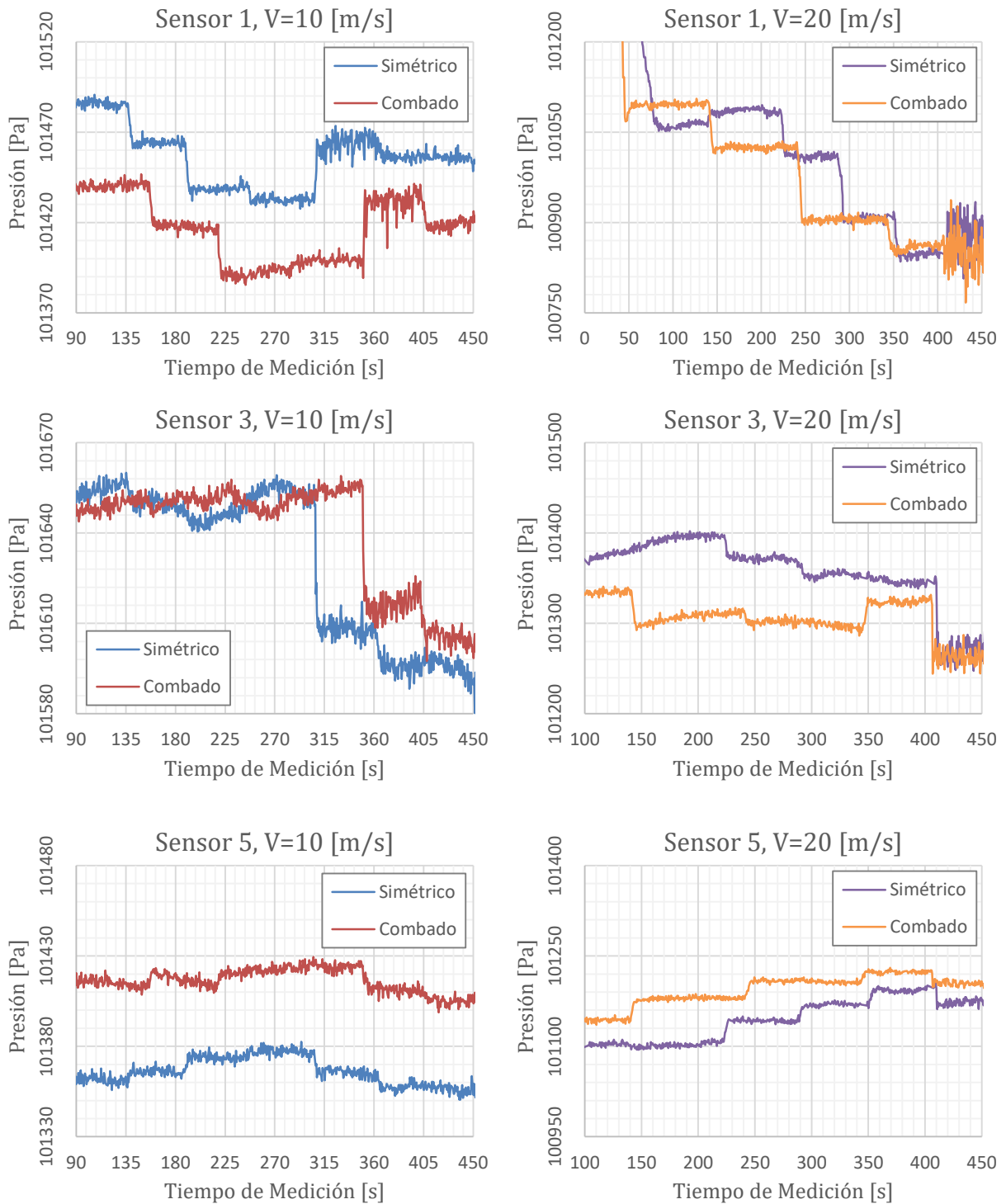


Figura 99: Comparación de registros de los sensores 1, 3 y 5 para ensayos con perfil simétrico y completamente flectado hacia abajo. A la izquierda pruebas a 10 [m/s], a la derecha pruebas a 20 [m/s].

Además de verificar la sensibilidad del sistema ante cambios de curvatura, los resultados presentados muestran consistencia con lo esperado basándose en la teoría. En el caso de los sensores del manto superior, en general, se observa que la presión disminuye al usar un perfil curvo para acelerar el flujo que pasa por encima del prototipo. Por su parte, el borde de salida del manto inferior registra un aumento de presión al desacelerarse el flujo producto de la curvatura. La Tabla 21, a continuación, presenta la eficiencia aerodinámica calculada

para los perfiles simétrico y combado. En esta se puede apreciar que la eficiencia aerodinámica del perfil con curvatura es mayor a su equivalente simétrico para prácticamente todos los ángulos de ataque.

Tabla 21: Eficiencia Aerodinámica en función del ángulo de ataque para los ensayos a 10 [m/s] y 20 [m/s] con perfiles en posición simétrica y posición de flexión máxima hacia abajo.

Velocidad [m/s]	Ángulo de ataque [°]	C_L/C_D [-]	
		Simétrico	Combado
10 [m/s]	0°	2.50	4.00
	5°	3.33	5.14
	10°	4.13	5.11
	15°	4.56	4.55
	20°	2.22	2.38
20 [m/s]	0°	1.33	1.20
	5°	4.00	8.00
	10°	6.75	8.68
	15°	7.75	6.67

Los datos de eficiencia aerodinámica calculados utilizando el registro manual obtenido desde las balanzas del túnel de viento permiten corroborar que el comportamiento observado de los gráficos de presión es consistente con la teoría. En consecuencia, el segundo ensayo preliminar consigue verificar un buen funcionamiento del sistema para realizar pruebas bajo un protocolo estandarizado.

8.3 Análisis del Ensayo bajo Protocolo de Flexión

Habiendo obtenido resultados positivos de los dos ensayos preliminares realizados, se concibe el ensayo bajo protocolo de flexión como una manera de obtener información detallada del efecto de la flexión en distintos grados sobre el estado del flujo sobre la probeta sensorizada. El protocolo utilizado para la recopilación de datos determinó que estos deban ser procesados a modo de presentar información gráfica y tabulada que sea de fácil entendimiento para el lector, como ya se hizo con los resultados presentados en las secciones 7.3.4.2 y 7.3.4.3.

A continuación, se presentan y analizan algunos parámetros aerodinámicos promediados relevantes, los cuales fueron generados a partir de la información recopilada. Cabe destacar que, para este ensayo, la probeta contaba con cuatro sensores en el manto superior y un quinto sensor en el borde de salida del manto inferior, los cuales son numerados comenzando desde el borde de ataque del manto superior.

8.3.1 Efecto del Estado de Flexión sobre el Arrastre y la Sustentación

En la sección 8.2.2, se comprobó que el cambio de curvatura del perfil produce una diferencia en el registro de presión por parte del sistema y que los datos de arrastre y sustentación recopilados se condicen con el comportamiento que describen las mediciones de presión. Por su parte, el tercer ensayo realizado provee de información sobre los cinco estados de

flexión ilustrados en la Fig. 49 de la sección 7.5.3, permitiendo realizar un análisis más detallado del efecto que tienen los distintos grados de curvatura en el arrastre y sustentación generados sobre el perfil.

Como se mencionó anteriormente, los ensayos a 5 [m/s] y 8 [m/s] fueron realizados en dos ocasiones. La Figuras 100 y 101 presentan el comportamiento del coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque para cada uno de los estados de flexión ensayados. En ellas se comparan las dos iteraciones de cada ensayo y, si bien los datos de arrastre y sustentación fueron obtenidos manualmente por medio del registro de las lecturas de la balanza del túnel de viento, los valores y comportamientos prácticamente idénticos de las curvas permiten asegurar que las condiciones de arrastre fueron replicadas para ambas duplas de ensayos.

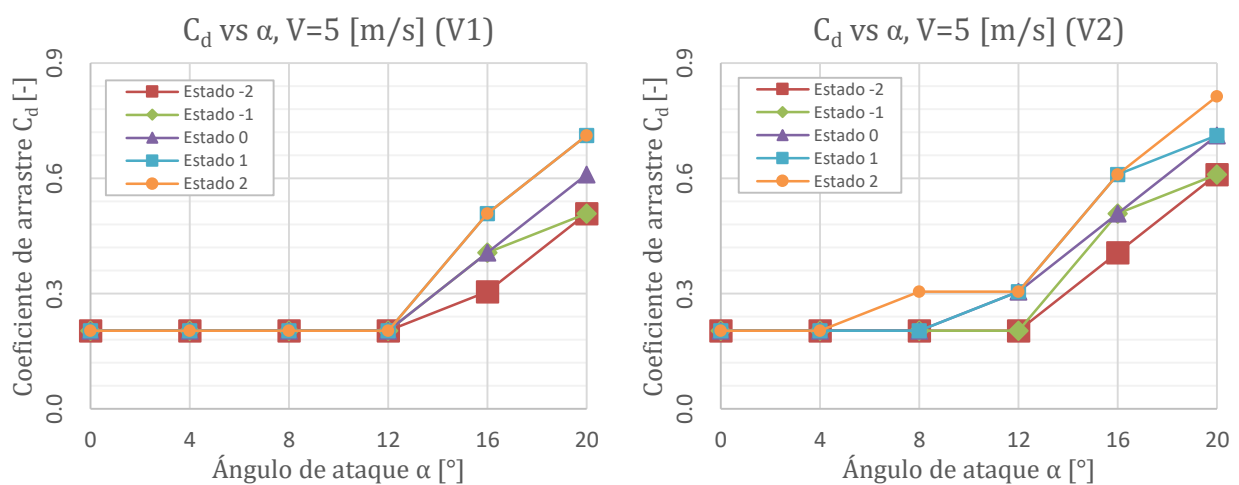


Figura 100: Comparación de los coeficientes de arrastre C_d para los ensayos realizados a 5 [m/s].

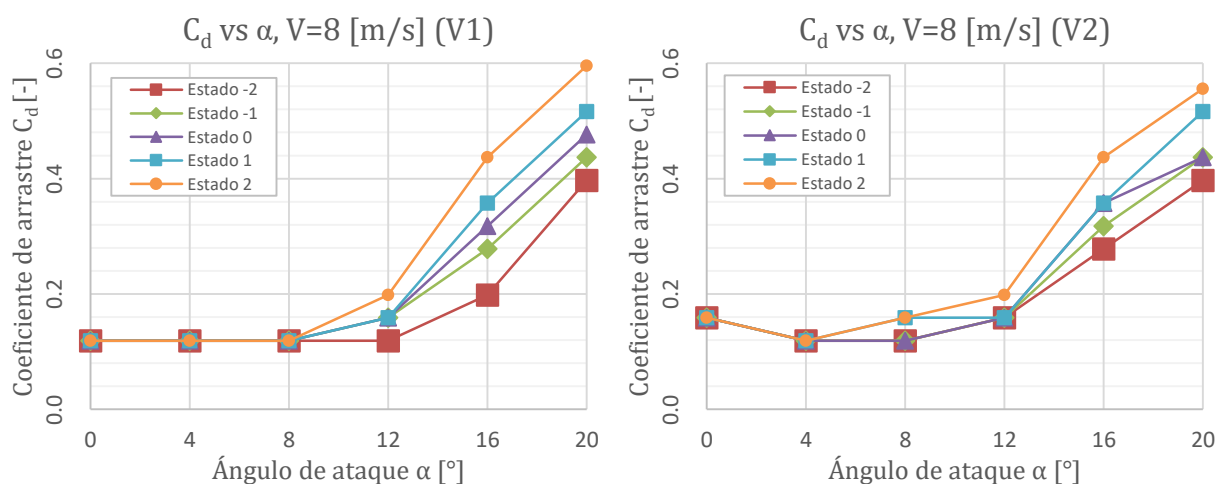


Figura 101: Comparación de los coeficientes de arrastre C_d para los ensayos realizados a 8 [m/s].

Se aprecia que, para ambas velocidades de flujo, se registra un coeficiente de arrastre mayor a medida que se flexa el perfil hacia abajo. Las mínimas diferencias existentes se adjudican a la calibración manual de las balanzas y a posibles lecturas erróneas por parte del usuario.

Del mismo modo, las Figuras 102 y 103 presentan las comparaciones del comportamiento del coeficiente de sustentación. Se comprueba que las condiciones de sustentación fueron replicadas en ambos ensayos para cada velocidad. Se observa que la sustentación generada por el perfil aumenta a medida que éste se flexa hacia abajo, además de presentar una notoria caída al superar el ángulo de ataque crítico de $\alpha=12^\circ$.

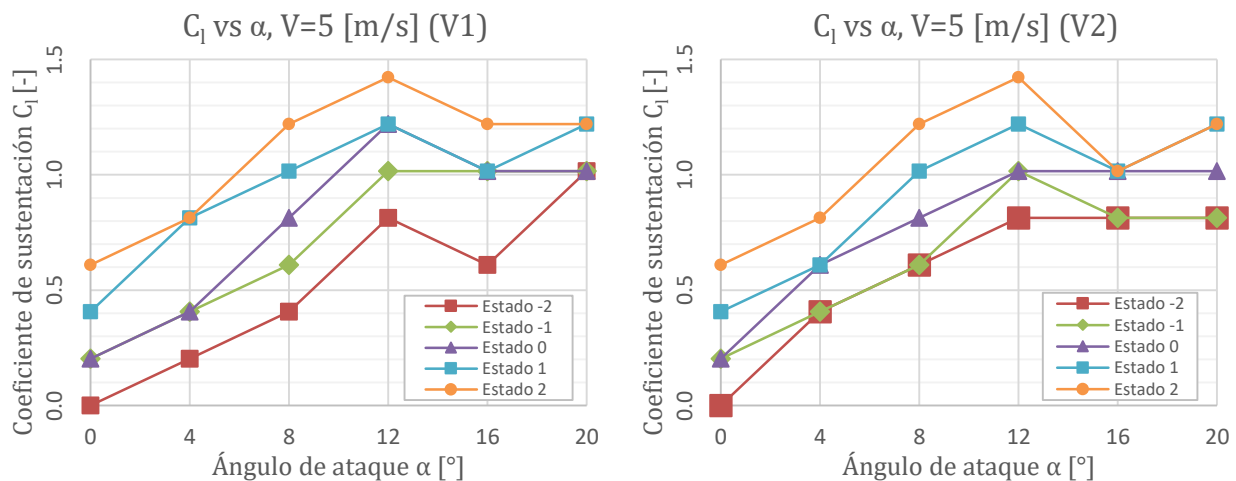


Figura 102: Comparación de los coeficientes de sustentación C_1 para los ensayos realizados a 5 [m/s].

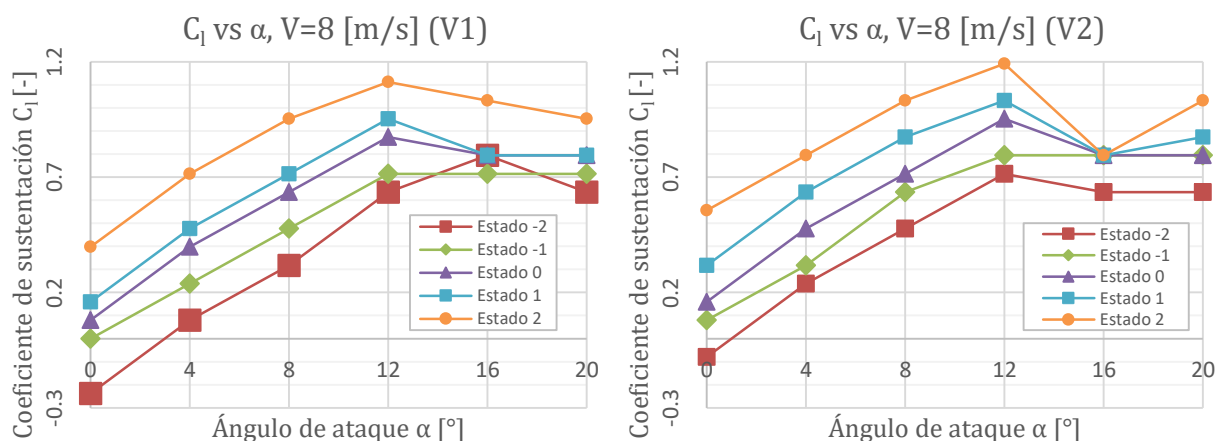


Figura 103: Comparación de los coeficientes de sustentación C_1 para los ensayos realizados a 8 [m/s].

Se aprecia que para las mediciones a 8 [m/s], el estado de flexión -2 registra un coeficiente de sustentación negativo para un ángulo de ataque $\alpha=0^\circ$. Esto tiene sentido si se considera que dicho estado de flexión corresponde a una curvatura del borde de ataque que apunta hacia arriba.

La Fig. 104 muestra el comportamiento del arrastre y la sustentación para el ensayo con un flujo a 16 [m/s]. Al igual que los ensayos a 8 [m/s], esta prueba presenta un coeficiente de sustentación negativo para el estado de flexión -2 en $\alpha=0^\circ$.

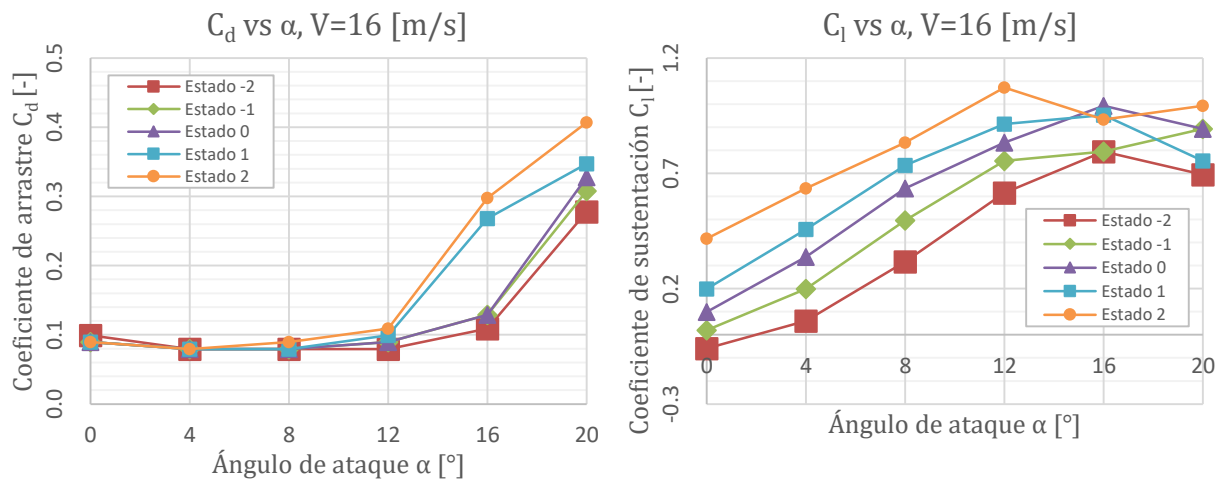


Figura 104: Coeficiente de arrastre C_d y coeficiente de sustentación C_l para el ensayo realizado a 16 [m/s].

Si bien los registros muestran un comportamiento acorde con la teoría y similar a los casos anteriores, es importante tener en cuenta que debido al régimen de flujo de mayor velocidad las lecturas son menos confiables. En particular, para ángulos de ataque superiores al α_{crit} se presentan fuertes oscilaciones en las mediciones de sustentación y, en consecuencia, se optó por utilizar el menor leído para calcular el coeficiente de sustentación.

8.3.2 Eficiencia Aerodinámica en respuesta al Estado de Flexión

Similar a los gráficos presentados en la sección anterior, las Figuras 105–107 ilustran datos recogidos manualmente durante el tercer ensayo. Éstas grafican la eficiencia aerodinámica calculada a partir de los valores antes entregados, lo que permite observar con claridad la caída en la capacidad que tiene el perfil para generar condiciones óptimas de vuelo al sobrepasar un ángulo de ataque crítico.

En general, se observa que a medida que el perfil se curva hacia abajo se obtienen eficiencias aerodinámicas mayores. Por otro lado, para los ensayos a 5 [m/s] y 8 [m/s], las segundas iteraciones entregan valores de C_l/C_d menores que las primeras pruebas en los rangos de ángulo de ataque más favorable, lo que se atribuye a lecturas de arrastre de mayor magnitud.

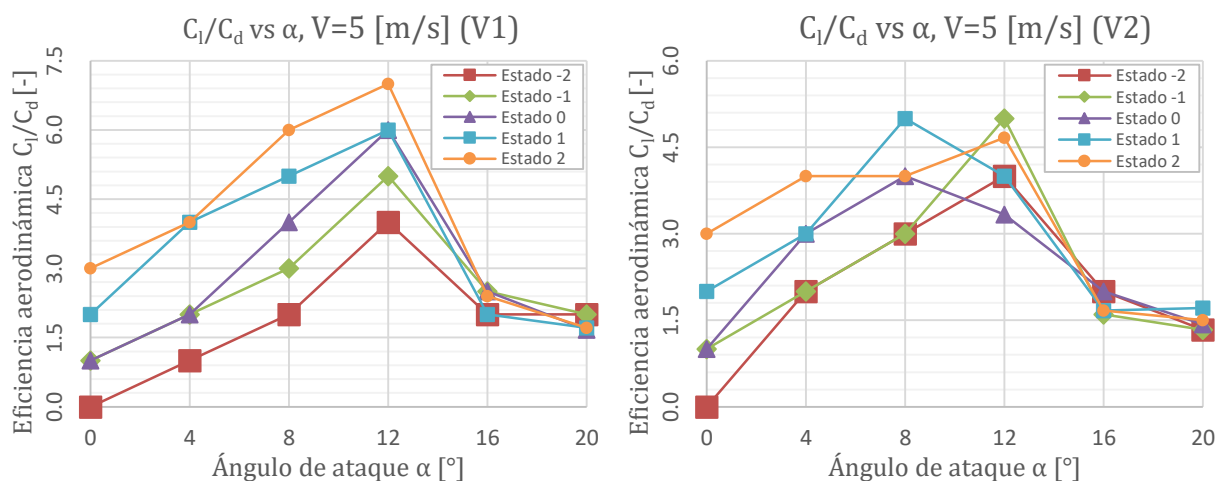


Figura 105: Comparación del coeficiente de eficiencia aerodinámica para las pruebas a 5 [m/s].

Es importante destacar que, si bien existe una marcada tendencia en cuanto a que la flexión del perfil mejora la eficiencia aerodinámica, los gráficos muestran que la flexión dinámica podría permitir que el asa flexible se adapte a condiciones adversas y prolongue un estado de mayor eficiencia aerodinámica ante condiciones desfavorables de flujo.

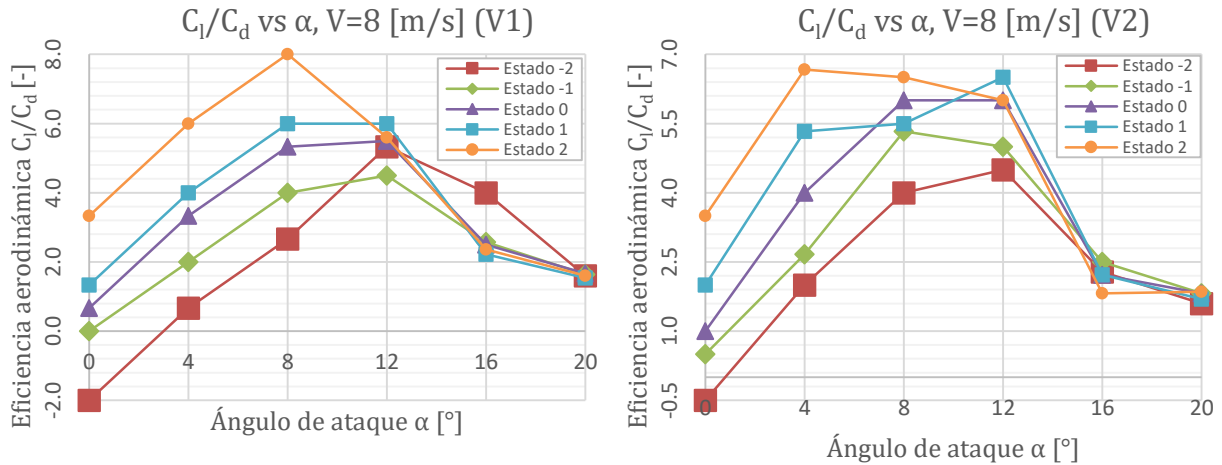


Figura 106: Comparación del coeficiente de eficiencia aerodinámica para las pruebas a 8 m/s.

Siguiendo con el punto anterior, se desprende de los gráficos presentados que en ocasiones en que se ha superado el ángulo de ataque crítico, el estado neutro o con flexión hacia arriba presentan una mayor eficiencia aerodinámica que el combado en dirección contraria. Esto ha sido también comprobado con anterioridad de manera visual, al someter el perfil a un régimen de pérdida de sustentación y ajustar manualmente la curvatura del prototipo a modo de eliminar las vibraciones observadas. Sin embargo, no se debe desechar la idea de que el registro de este comportamiento sea producto del carácter impreciso de la obtención de datos de arrastre y sustentación.

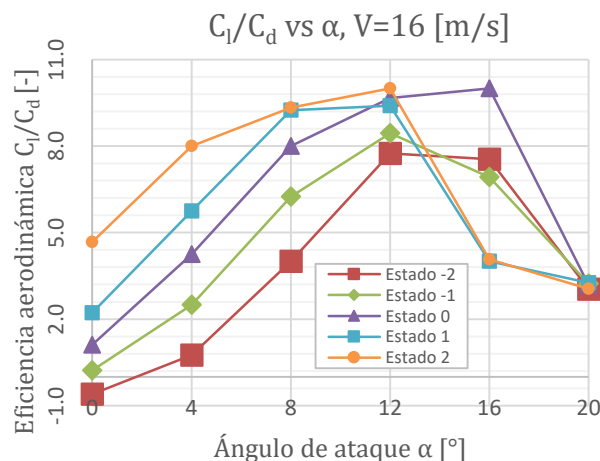


Figura 107: Coeficiente de eficiencia aerodinámica para el ensayo a 16 m/s.

8.3.3 Coeficiente de Presión C_p sobre el Manto Superior del Perfil

Los registros de presión recopilados haciendo uso del sistema electrónico implementado sobre la probeta fueron procesados para obtener el coeficiente de presión en los cuatro

puntos de medición ubicados en el manto superior. Este valor adimensional permite comparar la presión estática en un punto con respecto a la presión dinámica del flujo al que se opone el perfil, identificando, en teoría, puntos que delimitan rangos dentro de los cuales existe desprendimiento del flujo. Sin embargo, como se puede observar en la Fig. 108, independiente de la velocidad de flujo, del ángulo de ataque o del estado de flexión utilizados, el comportamiento del coeficiente de presión en los distintos puntos del manto se mantiene idéntico. Como se mencionó en la sección 9.1.1, dicho comportamiento se debe a la diferencia de base que presentan las mediciones de los sensores.

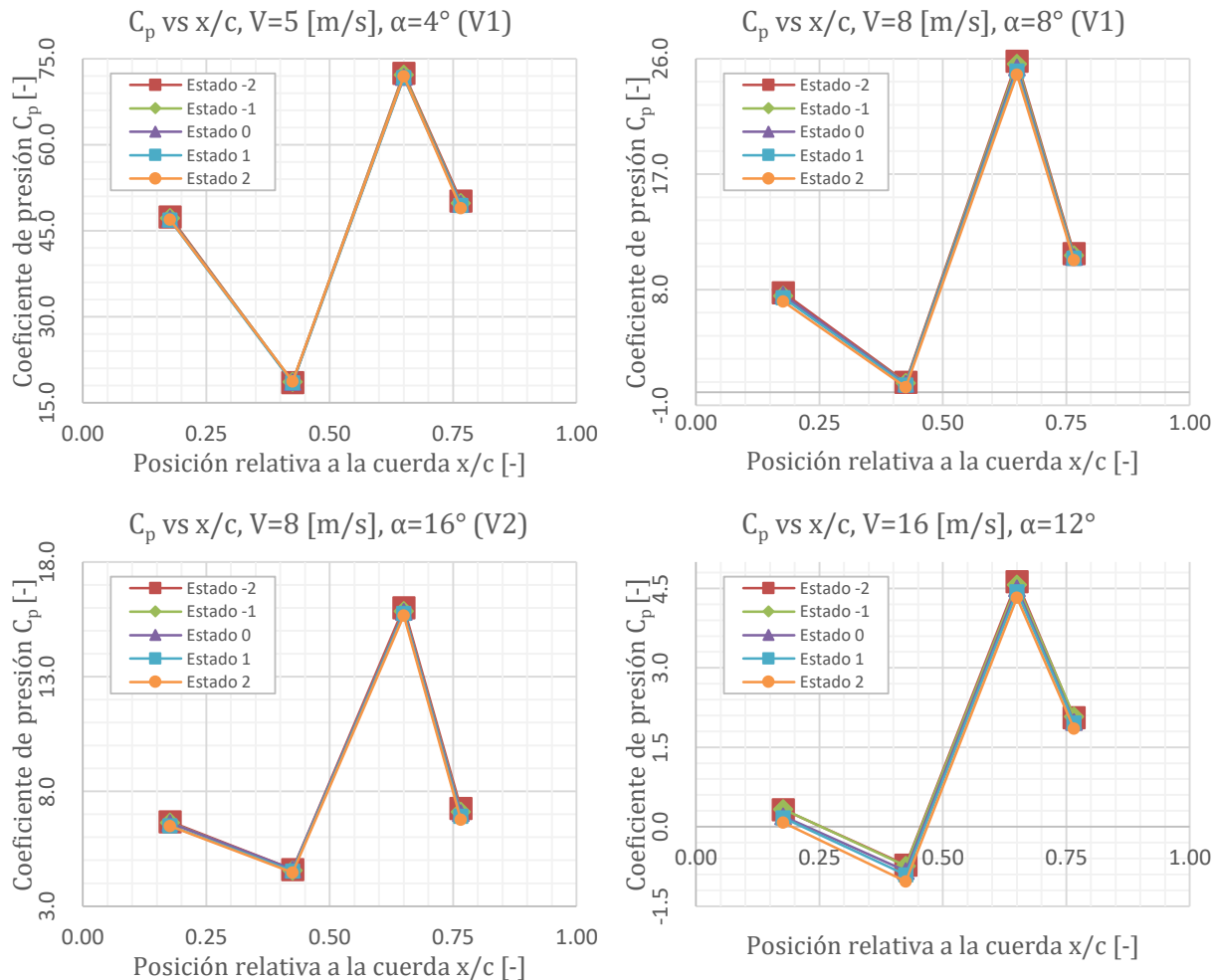


Figura 108: Coeficiente de presión C_p en función de la posición relativa a la cuerda x/c para varios regímenes de flujo y ángulos de ataque.

Otro de los factores importantes a considerar es el hecho de que los valores de presión utilizados para cada punto corresponden a promedios de las lecturas de los sensores en los intervalos de tiempos respectivos para cada uno de los ángulos de ataque y velocidades determinadas. En consecuencia, características como la oscilación y las tendencias ascendientes o descendientes se vieron eliminados a fin de comprimir toda esa información en un solo valor puntual.

Si bien el comportamiento observado no permite realizar un análisis respecto a la zona de desprendimiento, es posible notar que a medida que la probeta pasa del estado de flexión -2

hasta el estado 2, se registra una leve disminución en la presión registrada sobre el manto, lo que queda más claro al observar la Fig. 109 a continuación:

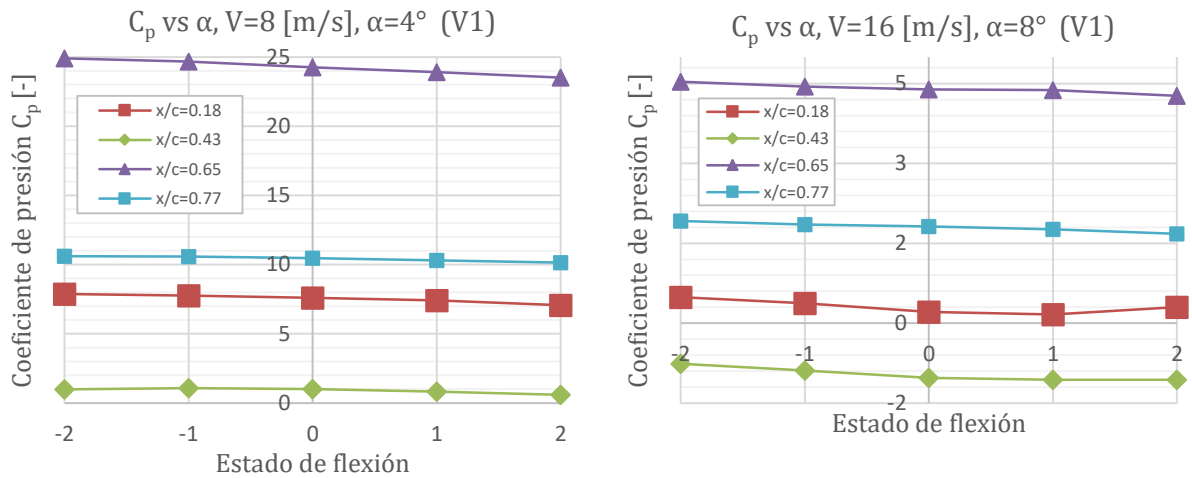


Figura 109: Coeficiente de presión C_p en función del estado de flexión. Cada línea representa una posición relativa a la cuerda.

Considerando que los gráficos antes presentados no aportan mayor información, se generaron los gráficos de las Figuras 110–112. En ellos se ilustra el efecto del cambio de estado de flexión y del ángulo de ataque para una posición específica y, en el caso de los ensayos a 5[m/s] y 8 [m/s], se comparan las dos iteraciones realizadas a cada una de esas velocidades de flujo.

En la Fig. 110 se aprecia que los resultados generados para dos conjuntos de datos recopilados en condiciones idénticas se comportan de manera completamente distinta. Mientras los datos recogidos durante la primera prueba a 5 [m/s] revelan una disminución del coeficiente de presión a medida que se flexa el perfil y se aumenta el ángulo de ataque, la segunda iteración se comporta de manera totalmente contraria para todos los puntos de interés. Además, las magnitudes de los coeficientes de presión registrados difieren hasta en un 50%. Esto se debe solamente a las mediciones de presión recogidas por los sensores y actúa como indicador de una mala consistencia del sistema.

El segundo conjunto de gráficos presentados en la Fig. 111, correspondiente a las pruebas realizadas bajo un flujo a 8 [m/s]. En lo que se refiere a las magnitudes, las diferencias son bastante menores que las del caso anterior. En cuanto al comportamiento, se observan diferencias, pero se mantiene la tendencia a que el estado de flexión máximo hacia abajo presenta menores valores de presión, además de disminuir a medida que se aumenta el ángulo de ataque. Se hace notar que la consistencia y calidad de las lecturas de los sensores de presión se hace mejor a mayores velocidades.

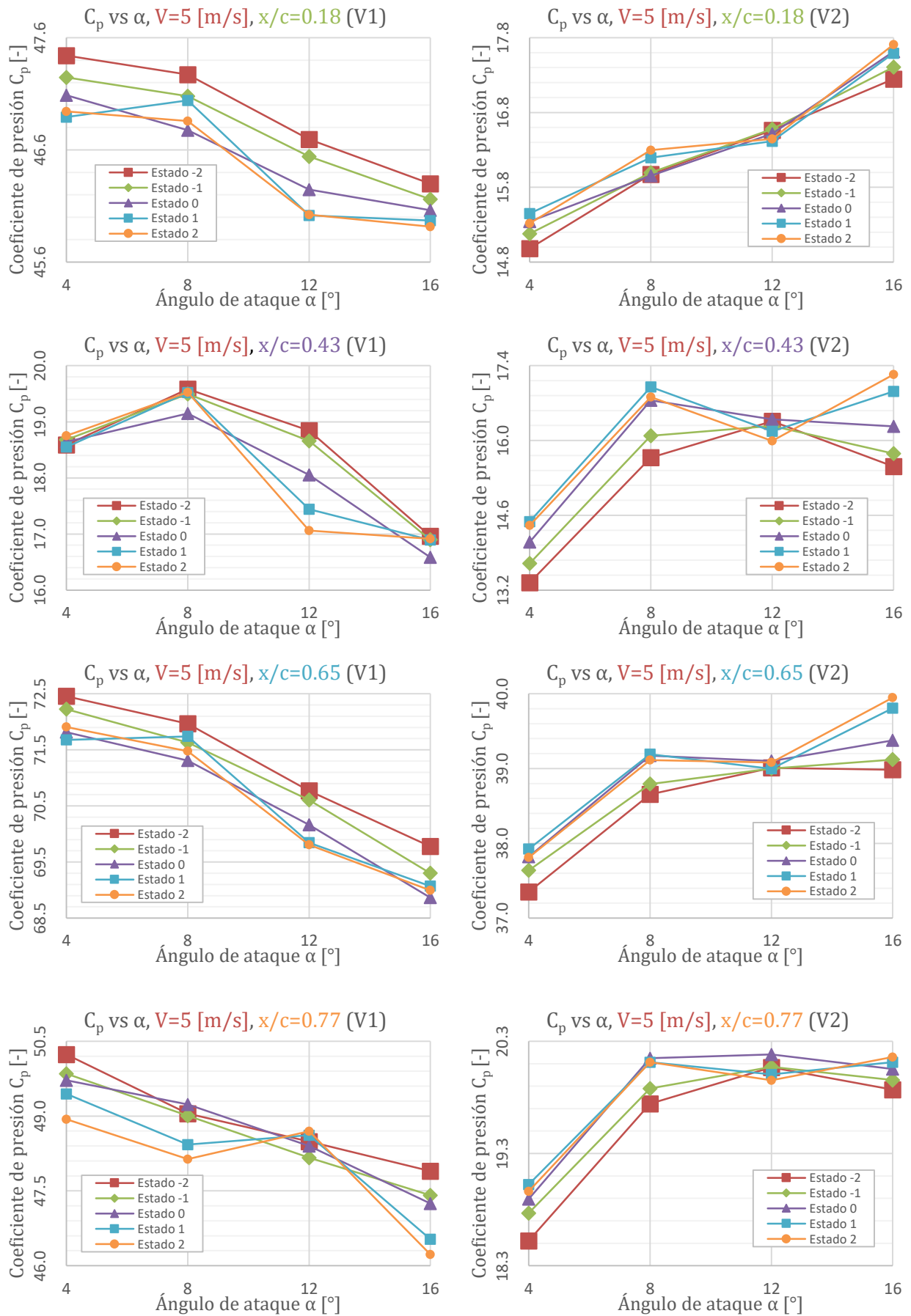


Figura 110: Comparación del coeficiente de presión entre las dos mediciones a 5 [m/s].

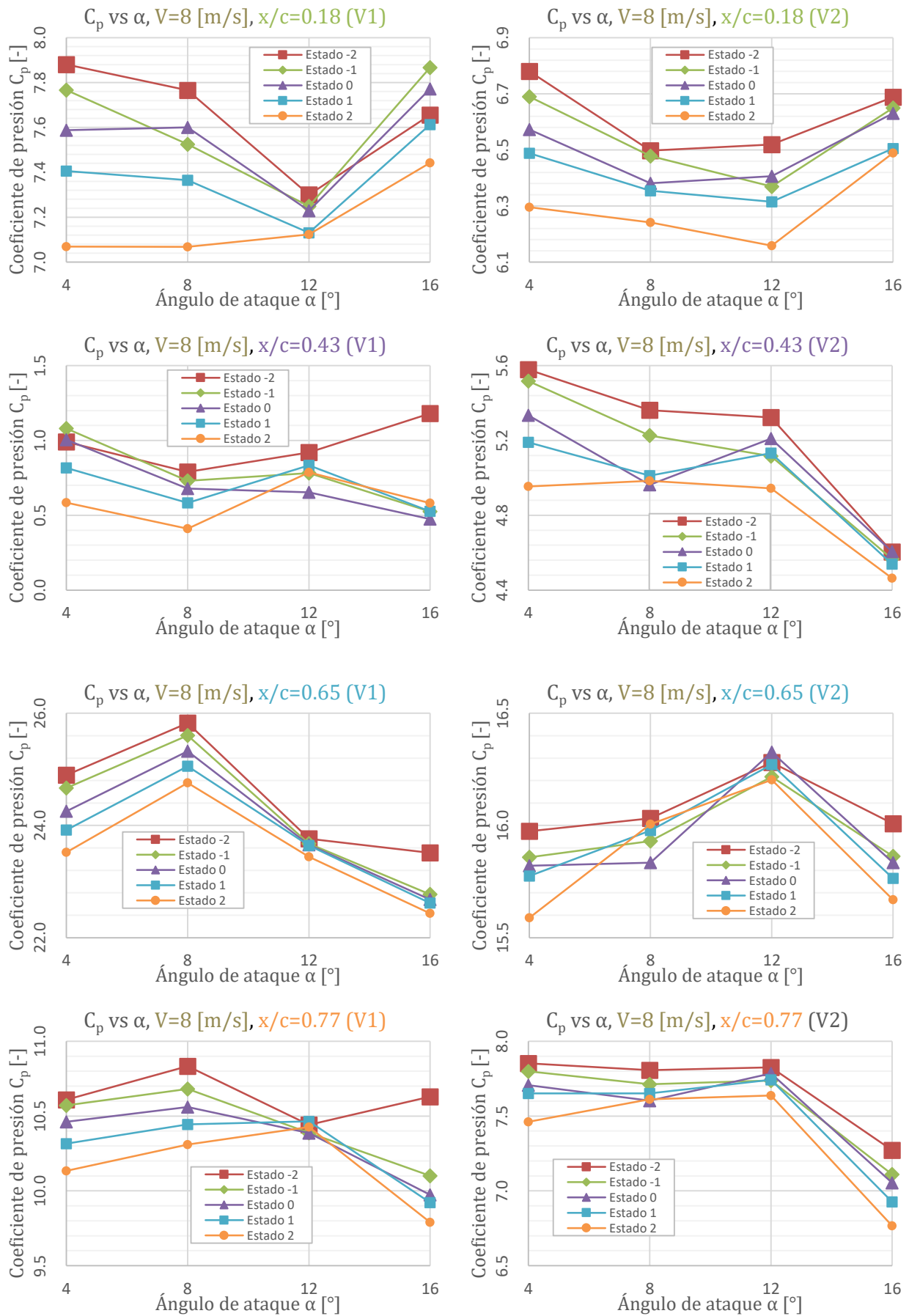


Figura 111: Comparación del coeficiente de presión entre las dos mediciones a 8 [m/s].

Por último, la Fig. 112 muestra los valores de C_p asociados al ensayo a 16 [m/s]. En general para todos los valores de x/c se observa que el estado de flexión colabora a una menor presión sobre el manto.

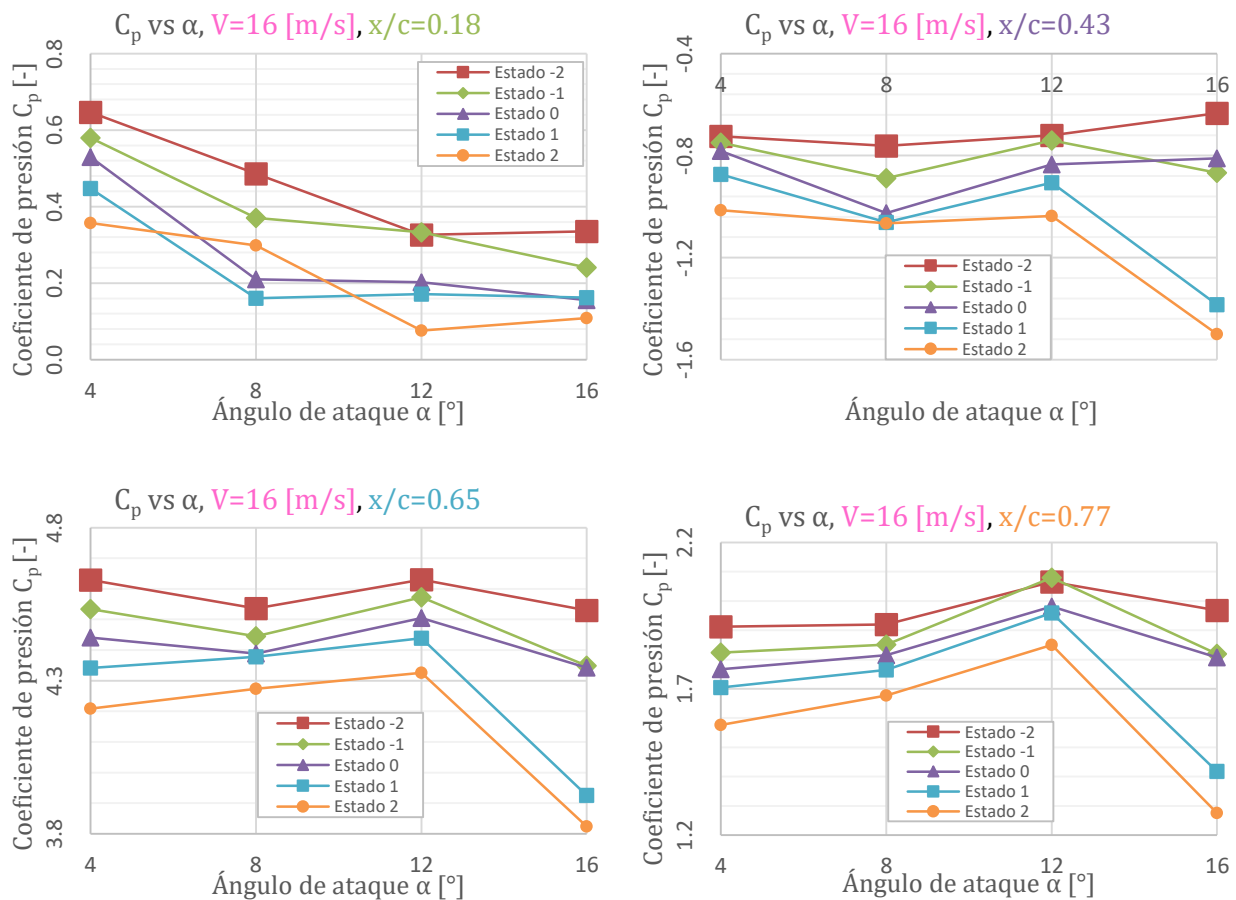


Figura 112: Coeficiente de presión para los distintos estados de flexión con flujo de 16 [m/s].

8.3.4 Zona de Desprendimiento de Flujo

Uno de los métodos de control propuestos durante el desarrollo del proyecto correspondía a un protocolo que permitiese al sistema electrónico identificar la zona en que ocurría el desprendimiento del flujo en el manto. Para ello, se propuso estimar la rapidez del fluido en los puntos de medición por medio de la ecuación de Bernoulli, obteniendo como resultado los datos presentados a continuación.

En la Fig. 113, se presentan gráficos de rapidez en función de la posición del punto de medición relativa al largo de la cuerda para los ensayos a 5 [m/s]. Si se realiza una comparación entre ensayos, se nota que el segundo ensayo no registra el mismo comportamiento que el primero. En general, se observa que al variar el ángulo de ataque desde un punto “estable” hasta otro que se encuentra sobre el ángulo de ataque crítico, el sistema muestra casi nulas variaciones para un mismo ensayo. En cuanto a lo que respecta a las diferencias entre iteraciones del ensayo, esto se condice con las inconsistencias antes advertidas en el sistema de medición y recopilación de datos.

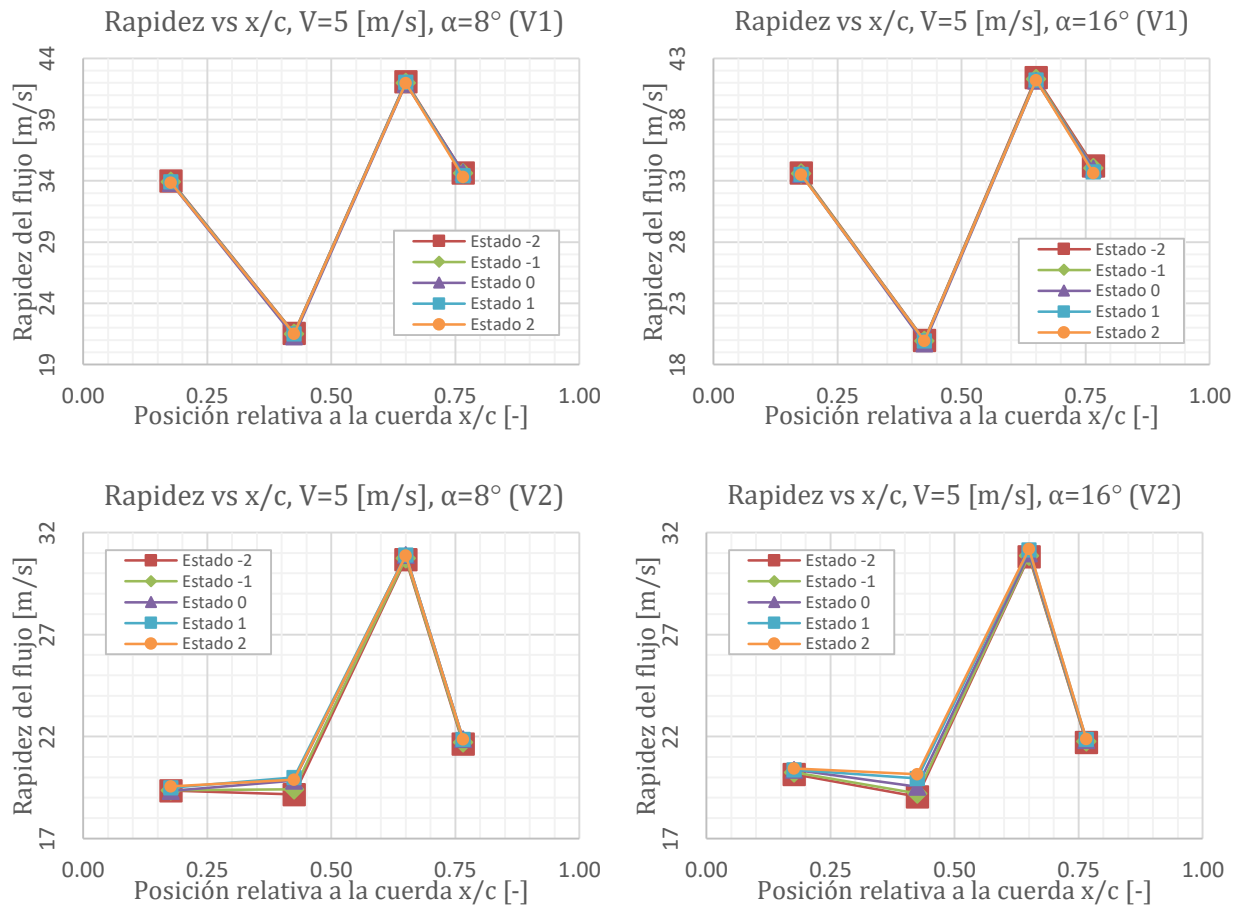
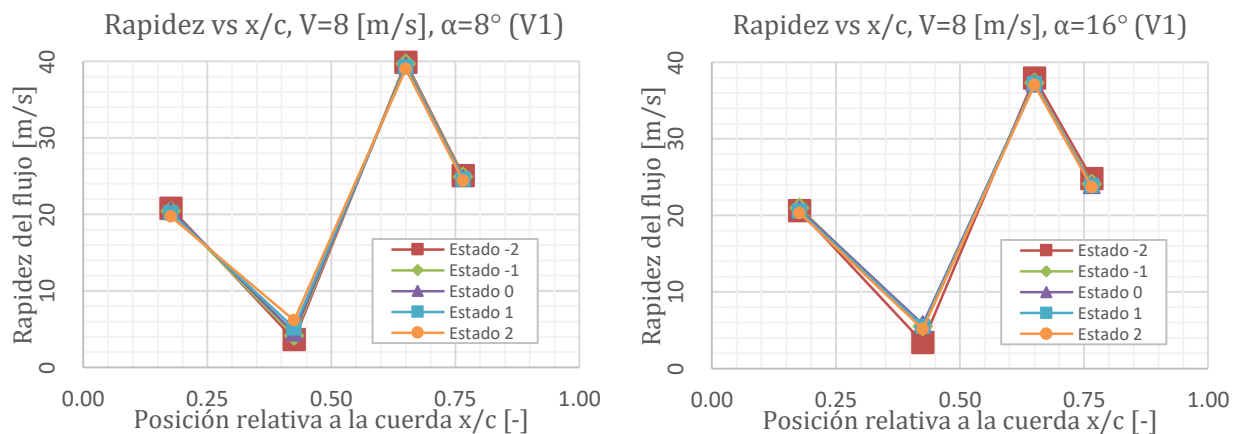


Figura 113: Zona de Desprendimiento de Flujo para pruebas a $V=5$ [m/s]. Comparación entre $\alpha=8^\circ$ y $\alpha=16^\circ$ de las dos iteraciones del ensayo.

Al observar la 114 que registra el comportamiento observado en los ensayos a 8 [m/s], se nota que se mantienen las observaciones realizadas para el ensayo a 5[m/s] en cuanto a la variación en función del ángulo de ataque. En esta ocasión, las diferencias entre las mediciones del primer y segundo ensayo no son tan evidentes. A la vez, se hace relevante mencionar que la caída en la rapidez observada en el segundo punto de medición sobre el manto superior, no puede ser tratado como un punto de separación debido a que es claramente una consecuencia de la medición base del sensor ubicado en dicha posición.



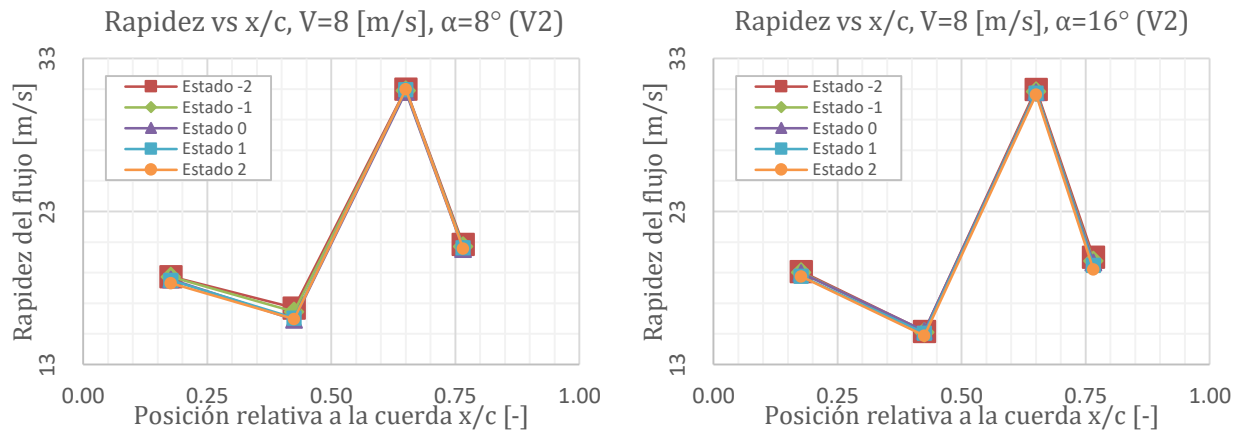


Figura 114: Zona de Desprendimiento de Flujo para pruebas a $V=8$ [m/s]. Comparación entre $\alpha=8^\circ$ y $\alpha=16^\circ$ de las dos iteraciones del ensayo.

La Fig. 115, presenta los resultados obtenidos para el ensayo realizado bajo un flujo a 16 [m/s]. De la misma forma que en los casos anteriores, no se observan mayores diferencias entre las mediciones bajo y sobre el ángulo de ataque crítico. Por otro lado, se observa que el segundo punto de medición, el cual mostraba registros más bajos de rapidez en los ensayos anteriores, en este caso se encuentra por sobre el valor del primer sensor. Esto se adjudica a que la alta velocidad del flujo, como ya se ha resaltado anteriormente, permite mejores registros de las variaciones de presión.

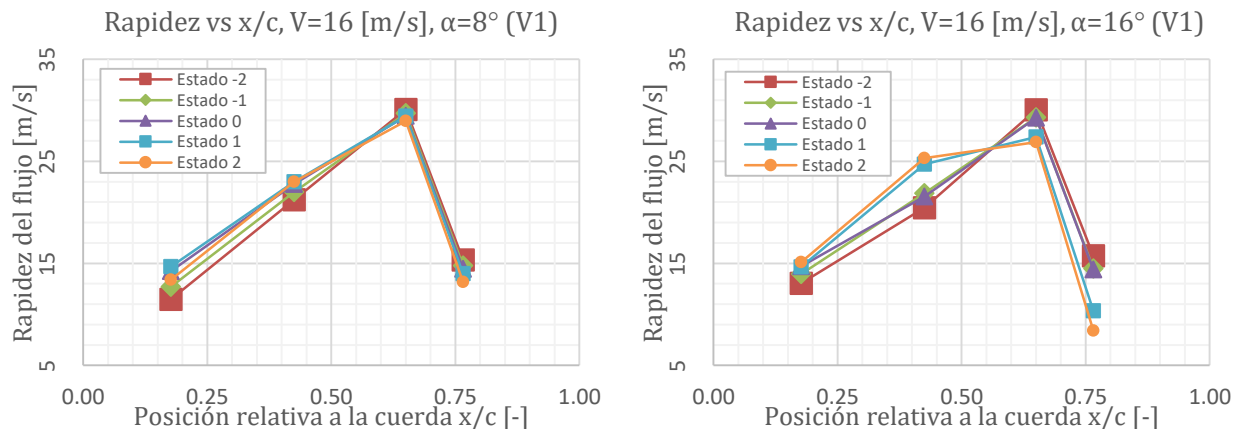


Figura 115: Zona de Desprendimiento de Flujo para pruebas a $V=16$ [m/s]. Comparación entre $\alpha=8^\circ$ y $\alpha=16^\circ$ de las dos iteraciones del ensayo.

En general, se resalta la relevancia que tiene el uso de valores de presión promediados para el cálculo de la rapidez en los puntos de medición. Además, cabe mencionarse que se aplicó valor absoluto a las variables en la ecuación para obtener resultados numéricos determinados, por lo que no se tiene información sobre la dirección del flujo.

Se concluye que, debido a las inconsistencias del método y los resultados presentados, no es posible determinar una zona de desprendimiento del flujo a modo de utilizarla como un parámetro de valor para la implementación de un sistema de control automático.

8.4 Análisis de la Recolección de Datos y Funcionamiento del Sistema

A partir del análisis de datos recogidos y de los resultados generados, es posible hacer un análisis global del funcionamiento del sistema y su capacidad para cumplir con las funciones que se requieren de él.

En primer lugar, la recolección de información por parte del sistema se cumple de muy buena manera para el caso de ensayos con un protocolo de acción bien definido. Sin embargo, el funcionamiento del adquisidor de datos no soporta mediciones por más de 1000 segundos, lo que indica que, de ser solicitado, se hace necesario buscar una nueva manera de recopilar información durante un hipotético funcionamiento continuo.

Por su parte, los datos de presión recopilados por el sistema presentan múltiples inconvenientes al ser procesados y utilizados como fuente de información para implementar un sistema de control automático. Si bien los sensores cuentan con una resolución y un rango de trabajo que se ajusta a las condiciones requeridas, el error nominal de 400 [Pa] que indica el proveedor genera inconsistencias relevantes a la hora de utilizar los datos recogidos para interpretar el estado aerodinámico del perfil. Parte de dichos inconvenientes pueden ser solucionados por medio de protocolos de calibración asociados a código, pero sin embargo eso no asegura que la sensibilidad de los instrumentos se ajuste de buena manera al problema específico que es la detección del gradiente de presión sobre el manto de un perfil alar.

Con respecto al último punto del párrafo anterior, el hecho de utilizar sensores cuyo fin original es el de capturar datos barométricos y de temperatura para realizar mediciones de presión dinámica en un flujo no es la opción más indicada. Sin embargo, las limitaciones dimensionales de la probeta hacen imposible equiparla con instrumentos más adecuados a la labor que se requiere que desarrolle.

Por último, el sistema actuador cumple casi a cabalidad las funciones que se requieren de él. Si bien se calculó un torque necesario para asegurar que el sistema contara con la potencia para realizar la acción de flexión del aparato, hubo elementos del prototipo que no fueron considerados y que provocaron que las deflexiones logradas por el perfil no fueran tan pronunciadas como se pretendía durante la fase de planificación. Aun así, las deformaciones logradas fueron suficientes para lograr cambios efectivos en el estado de flujo, abriendo paso para mejoras.

9 CONCLUSIONES Y DESAFÍOS A FUTURO

9.1 Cumplimiento de los Objetivos Generales

Habiendo tomado este proyecto desde una versión anterior, se presentaban varios desafíos y limitaciones asociados al trabajo previo. En vista de aquello, éste trabajo se planteó tres objetivos generales a cumplir:

1. Reemplazar el sistema de actuación de la probeta para que cumpla con su función de flectar el perfil de manera precisa.
2. Diseñar e implementar un sistema de control, que sea capaz de obtener lecturas de presión del flujo sobre el perfil y actuar en respuesta a las variaciones.
3. Recopilar datos relevantes para la interpretación del estado de flujo.

Si bien en un comienzo dichos objetivos se plantearon como puntos por separado, luego de realizar el proyecto es claro que los tres están interrelacionados y dependen, en cierta medida, los unos de los otros.

El primer objetivo de reemplazar el sistema de actuación fue un desafío que se afrontó en conjunto con Gajardo^[2], quien se encargó de rediseñar el perfil alar flexible. Para ello se tomó la decisión de pasar desde un servomotor a un motor de corriente continua conectado a un *encoder*. Dicha elección se hizo considerando las limitaciones de tamaño de la probeta a realizar y se realizó en varias etapas que permitieron la selección de un actuador completamente funcional. La iteración entre varios motores permitió conocer de mejor manera el funcionamiento del controlador PID que permite que el motor DC se comporte como un servomotor y se mueva para alcanzar posiciones de giro específicas. Por su parte, los cálculos de Gajardo^[2] permitieron estimar de manera bastante precisa el torque necesario para lograr la flexión de la probeta que él mismo diseñó. Para concluir, factores mejorables son:

- La eliminación del juego del motor ante cambios en la dirección de giro.
- Agregar torque extra que compense por las cargas “no evidentes” que agregan elementos como el manto del aparato, la deformación de los tendones y el roce del cableado.
- La implementación por medio de código de un protocolo que asegure que el actuador siempre termine en su posición neutra.

El segundo y tercer objetivo, por su parte, forman una serie de tareas iterativas que permiten el desarrollo del proyecto. Para diseñar e implementar un sistema de control automático es necesario hacer pruebas y recolectar información sobre el funcionamiento del sistema. Debido a ello, luego de plantear etapas de desarrollo, realizar un diseño conceptual y de seleccionar componentes a utilizar, se implementó el sistema electrónico como un instrumento de medición que permitiría obtener información relevante para mejorar su propio funcionamiento.

Al momento de seleccionar los componentes e implementar el sistema electrónico se tuvo en cuenta que los estos no eran los más indicados para la tarea debido a que se ajustaban a

una limitación de tamaño. No se utilizaron sensores que estuviesen diseñados para realizar específicamente la tarea de registrar presión de un flujo en movimiento y esto determinó que la calidad de las mediciones se viese afectada y generara la necesidad de repetir ensayos para comparar los resultados. Dichos ensayos permitieron a su vez, determinar la sensibilidad de los sensores y su potencial para ser utilizados en el sistema de control.

Por su parte, el sistema de control automático se planteó con diversas opciones. Dentro de las opciones barajadas destacan:

- La utilización de una base de datos de presión sobre el manto generada a través de simulación, la cual permitiese buscar estados aptos para mejorar la eficiencia del perfil flexible en el tiempo.
- El cálculo del punto de desprendimiento del flujo utilizando las lecturas de presión sobre el manto.
- Método de control PID en tiempo real basado en un factor generado en base a las lecturas de presión sobre el manto.

El objetivo de la recopilación de datos para la interpretación del estado de flujo fue cumplido gracias a la implementación del sistema de medición. Sin embargo, se corroboró que, a pesar de que el sistema cuenta con bastante sensibilidad ante las variaciones de presión del flujo, también carece de consistencia en las mediciones y necesita de calibración de las mediciones de los sensores previo al funcionamiento. En consecuencia, se tomó la decisión de concluir el proyecto en la fase de pruebas.

9.2 Observaciones Generales sobre el Desarrollo del Proyecto

El desarrollo del proyecto no presentó mayores complicaciones debido a una adecuada planificación del proceso mediante el cual se llevaría a cabo. El diseño conceptual de los módulos funcionales, en conjunto con una adecuada investigación sobre los componentes y circuitos utilizados por la comunidad de Arduino permitieron que las correcciones sólo se debieran a reemplazos para suplir potencia faltante o fallas de los componentes.

Por otro lado, es importante señalar que, a pesar de lo simple del proceso de desarrollo, el carácter iterativo de la implementación del sistema, además de los tiempos de instalación y acondicionamiento de conexiones pueden agregar una gran cantidad de horas al proceso. En cuanto a los componentes electrónicos que son vendidos en forma de circuitos integrados, estos suelen contar con documentación que permite hacer uso de ellos de manera inmediata y sin previo conocimiento de su funcionamiento electrónico. Sin embargo, el uso de placas *breakout* sacrifica la capacidad de disminuir el uso de espacio en sectores problemáticos, cómo lo fue en este caso la instalación de las placas sensoras en el manto del prototipo.

En lo que se refiere a la recopilación de datos, es necesario mencionar que tanto el sistema de adquisición de datos del aparato como el túnel de viento y sus balanzas no son el mejor equipo para obtener información confiable que permita establecer el estado aerodinámico del perfil. En el caso del sistema de medición electrónico, el adquisidor es muy propenso a la falla y requiere de constantes reinicios para asegurar que no se pierdan mediciones a medida

que se realizan pruebas. Por su parte, el ajuste de velocidad del túnel de viento se realiza con un instrumento de medición externo y las balanzas para medir fuerzas de arrastre y sustentación se ajustan manualmente cada vez que se instala un prototipo a medir y tienden a descalibrarse a medida que se les da uso.

9.3 Posibles Mejoras

Debido a que uno de los objetivos principales del proyecto no fue llevado a cabo, éste aún tiene un gran potencial de mejora. Algunas ideas para optimizar el prototipo y acercarse al control automático de mejor manera son:

9.3.1 Mejoras en el Diseño Material del Sistema

9.3.1.1 Circuitos hechos a la medida

Como se mencionó anteriormente, el uso de placas de circuitos integrados facilita la implementación de sistemas electrónicos para personas que no cuentan con una formación profunda en el tema. Sin embargo, con el conocimiento de electrónica adecuado, se pudo implementar los mismos sensores dejando gran parte de los componentes del circuito fuera del perfil flexible. Esto permitiría deshacerse de cables dentro del aparato y liberaría espacio para instalar una mayor cantidad de sensores a lo largo del manto del perfil o haría posible eliminar el juego del motor al instalar el *encoder* directamente en el eje del perfil.

La posibilidad de implementar circuitos a medida para un proyecto cuya principal limitante es el tamaño mejoraría en gran medida el desempeño del sistema.

9.3.1.2 Soporte del túnel de viento que no interfiera las mediciones

Durante el desarrollo de las pruebas en el túnel de viento se notó que tanto los cables como el soporte del perfil al túnel de viento interferían con el flujo de aire en la sección central del manto inferior. Esto determinó que uno de los sensores inferiores fuera simplemente desechado y transportado al manto superior, dejando sólo datos del borde de salida inferior.

Un nuevo soporte que no interfiera con la franja de medición sería ideal para obtener mediciones más limpias. Para ello se puede implementar un soporte que sujete el perfil desde los extremos de su envergadura o que lo sostenga de manera vertical. Esta última disposición tiene la desventaja de perder la capacidad de obtener mediciones de arrastre y sustentación por medio de las balanzas del túnel de viento.

9.3.2 Mejoras en el Diseño del Sistema

9.3.2.1 Retorno del motor a la posición neutra

Como se mencionó anteriormente, una buena adición al código del sistema de control del prototipo es un protocolo de apagado que se encargue de dejar el perfil en su posición neutra, ya que el *encoder* no posee un cero absoluto y siempre considerará que está en el cero al encenderse independiente de la posición en que se encuentre.

9.3.2.2 Protocolo de calibración de sensores

Una forma de mejorar el desempeño del sistema de medición de presión es implementar, vía código, un protocolo de inicio que se encargue de ajustar la medición de todos los sensores para que éstos coincidan al medir la presión antes de ser enfrentado a un flujo. De esta manera, sería posible eliminar las diferencias de base en la medición de los sensores y se podría, en teoría, obtener información más precisa del gradiente de presión sobre el manto del perfil.

9.4 Desafíos a Futuro

El principal desafío pendiente de este proyecto es el desarrollo e implementación del sistema de control automático. Existen en la teoría múltiples acercamientos para generar un sistema que sea capaz de modificar la curvatura del prototipo en tiempo real, como por ejemplo la descripción analítica del comportamiento del sistema mediante una función, o el ajuste de un controlador PID en función de un coeficiente aerodinámico relevante. Cada una de estas opciones incurre en sus propios costos de tiempo y procesamiento asociados y se pueden ajustar de mejor o peor manera al desempeño que se desea lograr por parte del sistema.

REFERENCIAS

- [1] Barrios, M. E., ***“Diseño y modelación numérica de paneles eólicos modulares con aplicaciones de la biomimética para perfiles alares,”*** Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [2] Gajardo, A. A., ***“Fabricación y prueba de un perfil alar flexible de alto rendimiento aerodinámico basado en tecnología FishBAC,”*** Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- [3] Comisión Nacional de Energía. (2020, Enero). ***“Reporte Mensual ERNC (Vol. N°41),”***. Recuperado de <http://energiaabierta.cl/reportes/>.
- [4] Johnson, S.J., van Dam, C.P., & Berg, D.E. ***“Active Load Control Techniques for Wind Turbines,”*** SAND2008-4809, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2008.
- [5] Manwell, J.F., McGowan, J.G., & Rogers, A.L. (2009). ***“Wind Energy Explained: theory, design, and application”***. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- [6] Åström, K.J., Murray, R.M., (2009, Febrero 22). ***“Feedback Systems: an introduction for scientists and engineers,”***. New Jersey, USA: Princeton University Press.
- [7] Larsen, T.J, Madsen, H.A., and Thomsen, K., ***“Active Load Reduction Using Individual Pitch, Based on Local Blade Flow Measurements,”*** Wind Energy, Vol. 8, 2004, pp. 67-80.
- [8] Bossanyi, E.A., ***“Developments in Individual Blade Pitch Control,”*** Proc. EAWE The Science of Making Torque From the Wind, Delft, the Netherlands, 2004.
- [9] Lobitz, D.W., Veers, P.S., Eisler, G.R., Laino, D.J., Migliore, P.G., and Bir, G., ***“The Use of Twisted Coupled Blades to Enhance the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines,”*** SAND01-1303, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2001.
- [10] DOE, ***“Variable Length Wind Turbine Blade,”*** DE-FG36-03G013171, June 30, 2005.
- [11] Berg, D.E., Zayas, J.R., Lobitz, D.W., van Dam, C.P., Chow, R., and Baker, J.P., ***“Active Aerodynamic Load Control of Wind Turbine Blades,”*** Proc. of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, San Diego, CA., 2007.
- [12] Enenkl, B., Klopper, V., and Preibler, D., ***“Full Scale Rotor with Piezoelectric Actuated Blade Flaps,”*** 28th European Rotorcraft Forum, 2002.

- [13] Roth, D., Enenkl, B., and Dieterich, O., ***“Active Rotor Control by Flaps for Vibration Reduction – Full Scale Demonstrator and First Flight Test Results,”*** 32nd European Rotorcraft Forum, 2006.
- [14] Basualdo, S., ***“Load Alleviation of Wind Turbine Blades Using Variable Airfoil Geometry,”*** *Wind Engineering*, Vol. 29, No. 2, 2005, pp. 169-182.
- [15] Troldborg, N., ***“Computational Study of the Risø-B1-18 airfoil with a Hinged Flap Providing Variable Trailing Edge Geometry,”*** *Wind Engineering*, Vol. 29, No. 2, 2005, pp. 89-113.
- [16] Buhl, T., Gaunaa, M., and Bak, C., ***“Potential Load Reduction Using Airfoils with Variable Trailing Edge Geometry,”*** *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 127, Nov. 2005, pp. 503-516.
- [17] Andersen, P.B., Gaunaa, M., Bak, C. and Buhl, T., ***“Load Alleviation on Wind Turbine Blades using Variable Airfoil Geometry,”*** *Proc. of 2006 European Wind Energy Conference and Exhibition*, Athens (GR), Feb.– Mar. 2006.
- [18] Bak, C., Gaunaa, M., Anderson, B.B., Buhl, T., Hansen, P., Clemmensen, K., and Moeller, R., ***“Wind Tunnel Test on Wind Turbine Airfoil with Adaptive Trailing Edge Geometry,”*** *AIAA Paper 2007-1016*, Jan. 2007.
- [19] Fuglsang, P., Bak, C., Gaunaa, M., and Antoniou, I., ***“Design and Verification of the Risø-B1 Airfoil Family for Wind Turbines,”*** *J. Sol. Energy Eng.*, Vol. 126, 2004, pp. 1002–1010.
- [20] ***“Mission Adaptive Compliant Wing (MACW),”*** *FlexSys Inc.*, Nov. 28, 2006.
- [21] Kota, S., Hetrick, J., Osborn, R., Paul, D., Pendleton, E., Flick, P., and Tilmann, C., ***“Design and Application of Compliant Mechanisms for Morphing Aircraft Structures,”*** *Proc. of SPIE*, Vol. 5054, 2003.
- [22] van Dam, C.P., Chow, R., Zayas, J.R., and Berg, D.E., ***“Computational Investigations of Small Deploying Tabs and Flaps for Aerodynamic Load Control,”*** *The Science of Making Torque from the Wind*, Denmark, J. Phys.: Conf. Series, Vol. 75, No.1, August 2007.
- [23] Mangla, N.L. and Sinha, S.K., ***“Controlling Dynamic Stall with an Active Flexible Wall,”*** *AIAA Paper 2004-2325*, June-July 2004.
- [24] Munday, D., and Jacob, J. D., ***“Flow Control Experiments for Low-Re Adaptive Airfoils,”*** *AIAA Paper 2000-0654*, Jan. 2000.

- [25] Munday, D., and Jacob, J. D., "**Active Control of Separation on a Wing with Conformal Camber,**" *AIAA Paper 2001-0293*, Jan. 2001.
- [26] Munday, D., and Jacob, J. D., "**Active Control of Separation on a Wing with Oscillating Camber,**" *Journal of Aircraft*, 39 No. 1, 2002.
- [27] Pern, N.J., "**Vortex Mitigation Using Adaptive Airfoils,**" *Master's Thesis*, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, Aug. 1999.
- [28] Pern, N.J, Jacob, J.D., and LeBeau, R.P., "**Characterization of Zero Flux Flow Control for Separation Control of an Adaptive Airfoil,**" *AIAA Paper 2006-3032*, 2006.

ANEXOS

Anexo 1: Código para lectura de *encoder* y controlador PID para motor.

```
pidmotor
1 double count = 0; //contador para el encoder
2 double angle = 0; //ángulo de giro
3 boolean A,B;
4 byte state, statep;
5
6 double pwm = 5; // pin de potencia para el motor
7 const int dir1 = 6; //direcciones de giro del motor
8 const int dir2 = 7;
9
10 double setpoint=420; // posición deseada
11 double Kp = 13; // variables del controlador PID, ajustar con método o por ensayo y error.
12 double Ki = 0;
13 double Kd = 0;
14
15 float last_error = 0;
16 float error = 0;
17 float changeError = 0;
18 float totalError = 0;
19 float pidTerm = 0;
20 float pidTerm_scaled = 0; // variable para escalar el término del PID.
21
22 void setup() {
23   Serial.begin(9600);
24   pinMode(2, INPUT); //encoder pins
25   pinMode(3, INPUT);
26   attachInterrupt(0,Achange,CHANGE); //interrupt pins para encoder
27   attachInterrupt(1,Bchange,CHANGE);
28
29   pinMode(pwm, OUTPUT);
30   pinMode(dir1, OUTPUT);
31   pinMode(dir2, OUTPUT);
32
33 }
34
35 void loop(){
36
37   PIDcalculation(); // rutina que calcula el valor del PID
38
39   if (angle < setpoint) {
40     digitalWrite(dir1, LOW); // giro positivo del motor
41     digitalWrite(dir2, HIGH);
42   } else {
43     digitalWrite(dir1, HIGH); // giro negativo del motor
44     digitalWrite(dir2, LOW);
45   }
46
47   analogWrite(pwm, pidTerm_scaled);
48   Serial.println("ANGULO:");
49   Serial.print(angle);
50
51   delay(50);
52
53 }
54
```

```
55 void PIDcalculation(){
56     angle = (0.043*count); // conversion contador-angulo
57     error = setpoint - angle;
58
59     changeError = error - last_error; // factor derivativo
60     totalError += error; // factor integral
61     pidTerm = (Kp * error) + (Ki * totalError) + (Kd * changeError); // potencia aportada
62     pidTerm = constrain(pidTerm, -255, 255); // se acota el término
63     pidTerm_scaled = abs(pidTerm); // debe ser positivo
64     last_error = error;
65 }
66
67 void Achange() // funciones para leer la cuenta del encoder
68 {
69     A = digitalRead(2);
70     B = digitalRead(3);
71
72     if ((A==HIGH)&&(B==HIGH)) state = 1;
73     if ((A==HIGH)&&(B==LOW)) state = 2;
74     if ((A==LOW)&&(B==LOW)) state = 3;
75     if((A==LOW)&&(B==HIGH)) state = 4;
76     switch (state)
77     {
78         case 1:
79         {
80             if (statep == 2) count++;
81             if (statep == 4) count--;
82             break;
83         }
84         case 2:
85         {
86             if (statep == 1) count--;
87             if (statep == 3) count++;
88             break;
89         }
90         case 3:
91         {
92             if (statep == 2) count --;
93             if (statep == 4) count ++;
94             break;
95         }
96         default:
97         {
98             if (statep == 1) count++;
99             if (statep == 3) count--;
100        }
101    }
102    statep = state;
103
104 }
105
106 void Bchange ()
107 {
108     A = digitalRead(2);
109     B = digitalRead(3);
110
111     if ((A==HIGH)&&(B==HIGH)) state = 1;
112     if ((A==HIGH)&&(B==LOW)) state = 2;
113     if ((A==LOW)&&(B==LOW)) state = 3;
114     if((A==LOW)&&(B==HIGH)) state = 4;
115     switch (state)
```

```
116 {
117     case 1:
118     {
119         if (statep == 2) count++;
120         if (statep == 4) count--;
121         break;
122     }
123     case 2:
124     {
125         if (statep == 1) count--;
126         if (statep == 3) count++;
127         break;
128     }
129     case 3:
130     {
131         if (statep == 2) count --;
132         if (statep == 4) count ++;
133         break;
134     }
135     default:
136     {
137         if (statep == 1) count++;
138         if (statep == 3) count--;
139     }
140 }
141 statep = state;
142
143 }
```

Anexo 2: Código para lectura del sensor provisto por el fabricante.

```
SparkFunPressure
35 #include <Wire.h>
36 #include "SparkFunMPL3115A2.h"
37
38 //Create an instance of the object
39 MPL3115A2 myPressure;
40
41 void setup()
42 {
43     Wire.begin();           // Join i2c bus
44     Serial.begin(9600);    // Start serial for output
45
46     myPressure.begin();    // Get sensor online
47
48     // Configure the sensor
49     //myPressure.setModeAltimeter(); // Measure altitude above sea level in meters
50     myPressure.setModeBarometer(); // Measure pressure in Pascals from 20 to 110 kPa
51
52     myPressure.setOversampleRate(7); // Set Oversample to the recommended 128
53     myPressure.enableEventFlags(); // Enable all three pressure and temp event flags
54 }
55
56 void loop()
57 {
58     float pressure = myPressure.readPressure();
59     Serial.print("Pressure (Pa) :");
60     Serial.print(pressure, 2);
61 }
```

```
74 float temperature = myPressure.readTempF();
75 Serial.print(" Temp(f):");
76 Serial.print(temperature, 2);
77
78 Serial.println();
79 }
```

Anexo 3: Código para lectura de múltiples sensores usando el mux.

mux_pressure

```
1 #include <Wire.h>
2 #include "SparkFunMPL3115A2.h"
3
4 MPL3115A2 myPressure;
5
6 #define NUMBER_OF_SENSORS 5
7 float crx = 6000.00;
8
9 void setup()
10 {
11   Serial.begin(9600);
12   Serial.println("Qwiic Mux Shield Read Example");
13
14   Wire.begin();
15
16   //Initialize all the sensors
17   for (byte x = 0 ; x < NUMBER_OF_SENSORS ; x++)
18   {
19     enableMuxPort(x); //Tell mux to connect to port X
20     myPressure.begin(); //Init the sensor connected to this port
21     myPressure.setModeBarometer(); //Measure pressure in Pascals from 20 to 110 kPa
22     myPressure.setOversampleRate(7); // Set Oversample to the recommended 128
23     myPressure.enableEventFlags(); // Enable all three pressure and temp event flags
24     disableMuxPort(x);
25   }
26
27   Serial.println("Mux Shield online");
28 }
29
30 void loop()
31 {
32   for (byte x = 0 ; x < NUMBER_OF_SENSORS ; x++)
33   {
34     enableMuxPort(x); //Tell mux to connect to this port, and this port only
35
36     float pressure = myPressure.readPressure();
37     if (x == 0){
38       float p1 = pressure;
39     }
40     else if (x == 1){
41       float p2 = pressure - crx;
42     }
43     else if (x == 2){
44       float p3 = pressure;
45     }
46   }
47 }
```

```
46     else if (x == 3){
47         float p3 = pressure;
48     }
49     else if (x == 4){
50         float p4 = pressure;
51     }
52     else{
53         float p5 = pressure;
54     }
55     Serial.print("Pressure ");
56     Serial.print(x+1);
57     Serial.print(" (Pa): ");
58     Serial.print(pressure, 2);
59     Serial.println(); // Print new line every time.
60
61     disableMuxPort(x); //Tell mux to disconnect from this port
62     delay(1000); //Wait for next reading
63 }
64 }
65
66 #define MUX_ADDR 0x70 //7-bit unshifted default I2C Address
67 |
68 boolean enableMuxPort(byte portNumber) //Enables a specific port number
69 {
70     if(portNumber > 7) portNumber = 7;
71
72     //Read the current mux settings
73     Wire.requestFrom(MUX_ADDR, 1);
74     if(!Wire.available()) return(false); //Error
75     byte settings = Wire.read();
76
77     //Set the wanted bit to enable the port
78     settings |= (1 << portNumber);
79
80     Wire.beginTransmission(MUX_ADDR);
81     Wire.write(settings);
82     Wire.endTransmission();
83
84     return(true);
85 }
86
87 boolean disableMuxPort(byte portNumber) //Disables a specific port number
88 {
89     if(portNumber > 7) portNumber = 7;
90
91     //Read the current mux settings
92     Wire.requestFrom(MUX_ADDR, 1);
93     if(!Wire.available()) return(false); //Error
94     byte settings = Wire.read();
95
96     //Clear the wanted bit to disable the port
97     settings &= ~(1 << portNumber);
98
99     Wire.beginTransmission(MUX_ADDR);
100    Wire.write(settings);
101    Wire.endTransmission();
102
103    return(true);
104 }
```

Anexo 4: Código de adquisición de datos de presión.

```
mux_pressure_recopilador
1 #include <Wire.h>
2 #include "SparkFunMPL3115A2.h"
3
4 MPL3115A2 myPressure;
5
6 #define NUMBER_OF_SENSORS 5
7 float p1; //variable
8 float p2;
9 float p3;
10 float p4;
11 float p5;
12
13 void setup()
14 {
15   Serial.begin(9600);
16   //Serial.println("Qwiic Mux Shield Read Example");
17
18   Wire.begin();
19
20   //Initialize all the sensor
21   for (byte x = 0 ; x < NUMBER_OF_SENSORS ; x++)
22   {
23     enableMuxPort(x); //Tell mux to connect to port X
24     myPressure.begin(); //Init the sensor connected to this port
25     myPressure.setModeBarometer(); //Measure pressure in Pascals from 20 to 110 kPa
26     myPressure.setOversampleRate(7); // Set Oversample to the recommended 128
27     myPressure.enableEventFlags(); // Enable all three pressure and temp event flags
28     disableMuxPort(x);
29   }
30   //Serial.println("Mux Shield online");
31   Serial.println("CLEARSHEET"); // clears sheet starting at row 1
32   Serial.println("LABEL,Date,Time,Timer,Pressure 1,Pressure 2, Pressure 3, Pressure 4, Pressure 5");
33 }
34
35 void loop()
36 {
37   for (byte x = 0 ; x < NUMBER_OF_SENSORS ; x++)
38   {
39     enableMuxPort(x); //Tell mux to connect to this port, and this port only
40
41     float pressure = myPressure.readPressure();
42     if (x == 0){
43       p1 = pressure;
44     }
45     else if (x == 1){
46       p2 = pressure - 3900;
47     }
48     else if (x == 2){
49       p3 = pressure;
50     }
51     else if (x == 3){
52       p4 = pressure;
53     }
54     else {
55       p5 = pressure;
56       Serial.println( (String) "DATA,DATE,TIME,TIMER," + p1 + "," + p2 + "," + p3 + "," + p4 + "," +
57         p5 + "," + ",AUTOSCROLL_20" );
58     }
59
60     disableMuxPort(x); //Tell mux to disconnect from this port
61     delay(100); //Wait for next reading
62   }
63 }
```

```

65 #define MUX_ADDR 0x70 //7-bit unshifted default I2C Address
66
67 boolean enableMuxPort(byte portNumber) //Enables a specific port number
68 {
69     if(portNumber > 7) portNumber = 7;
70
71     //Read the current mux settings
72     Wire.requestFrom(MUX_ADDR, 1);
73     if(!Wire.available()) return(false); //Error
74     byte settings = Wire.read();
75
76     //Set the wanted bit to enable the port
77     settings |= (1 << portNumber);
78
79     Wire.beginTransmission(MUX_ADDR);
80     Wire.write(settings);
81     Wire.endTransmission();
82
83     return(true);
84 }
85
86 boolean disableMuxPort(byte portNumber) //Disables a specific port number
87 {
88     if(portNumber > 7) portNumber = 7;
89
90     //Read the current mux settings
91     Wire.requestFrom(MUX_ADDR, 1);
92     if(!Wire.available()) return(false); //Error
93     byte settings = Wire.read();
94
95     //Clear the wanted bit to disable the port
96     settings &= ~(1 << portNumber);
97
98     Wire.beginTransmission(MUX_ADDR);
99     Wire.write(settings);
100    Wire.endTransmission();
101
102    return(true);
103 }

```

Anexo 5: Código para la botonera de estados de flexión.

botonera

```

1 double count = 0; ///contador para el encoder
2 double angle = 0; //ángulo de giro
3 boolean A,B;
4 byte state, statep;
5
6 double pwm = 5; // pin de potencia para el motor
7 const int dir1 = 6; //direcciones de giro del motor
8 const int dir2 = 7;
9
10 const int boton1 = 9; // pins para la botonera
11 const int boton2 = 10;
12 const int boton3 = 11;
13 const int boton4 = 12;
14 const int boton5 = 13;

```

```
16 int estado1; // variable para lectura del boton
17 int estado2;
18 int estado3;
19 int estado4;
20 int estado5;
21
22 double setpoint=0; // posición deseada
23 double Kp = 20; // variables del controlador PID, ajustar con método o por ensayo y error.
24 double Ki = 0;
25 double Kd = 0;
26
27 float last_error = 0;
28 float error = 0;
29 float changeError = 0;
30 float totalError = 0;
31 float pidTerm = 0;
32 float pidTerm_scaled = 0; // variable para escalar el término del PID
33
34
35 void setup() {
36   Serial.begin(9600);
37   pinMode(2, INPUT); // encoder pins
38   pinMode(3, INPUT);
39   attachInterrupt(0, Achange, CHANGE); // interrupt pins para encoder
40   attachInterrupt(1, Bchange, CHANGE);
41
42   pinMode(boton1, INPUT);
43   pinMode(boton2, INPUT);
44   pinMode(boton3, INPUT);
45   pinMode(boton4, INPUT);
46   pinMode(boton5, INPUT);
47
48   pinMode(pwm, OUTPUT);
49   pinMode(dir1, OUTPUT);
50   pinMode(dir2, OUTPUT);
51 }
52
53 void loop() {
54
55   PIDcalculation(); // find PID value
56   estado1 = digitalRead(boton1);
57   estado2 = digitalRead(boton2);
58   estado3 = digitalRead(boton3);
59   estado4 = digitalRead(boton4);
60   estado5 = digitalRead(boton5);
61
62   if (estado1 == HIGH) {delay(100); if (estado1 == HIGH) {setpoint = -700;}}
63   if (estado2 == HIGH) {delay(100); if (estado2 == HIGH) {setpoint = -250;}}
64   if (estado3 == HIGH) {delay(100); if (estado3 == HIGH) {setpoint = 0;}}
65   if (estado4 == HIGH) {delay(100); if (estado4 == HIGH) {setpoint = 250;}}
66   if (estado5 == HIGH) {delay(100); if (estado5 == HIGH) {setpoint = 500;}}
67
68   if (angle < setpoint) {
69     digitalWrite(dir1, LOW); // giro positivo del motor
70     digitalWrite(dir2, HIGH);
71   } else {
72     digitalWrite(dir1, HIGH); // giro negativo del motor
73     digitalWrite(dir2, LOW);
74   }
```

```
76 analogWrite(pwm, pidTerm_scaled);
77 Serial.println("ANGULO:");
78 Serial.print(angle);
79 }
80
81 void PIDcalculation(){
82   angle = (0.043*count); // conversion contador-angulo
83   error = setpoint - angle;
84
85   changeError = error - last_error; // factor derivativo
86   totalError += error; // factor integral
87   pidTerm = (Kp * error) + (Ki * totalError) + (Kd * changeError); // potencia aportada
88   pidTerm = constrain(pidTerm, -255, 255); // se acota el término
89   pidTerm_scaled = abs(pidTerm); // debe ser positivo
90   last_error = error;
91 }
92
93 void Achange() // funciones para leer la cuenta del encoder
94 {
95   A = digitalRead(2);
96   B = digitalRead(3);
97
98   if ((A==HIGH)&&(B==HIGH)) state = 1;
99   if ((A==HIGH)&&(B==LOW)) state = 2;
100  if ((A==LOW)&&(B==LOW)) state = 3;
101  if ((A==LOW)&&(B==HIGH)) state = 4;
102  switch (state)
103  {
104    case 1:
105    {
106      if (statep == 2) count++;
107      if (statep == 4) count--;
108      break;
109    }
110    case 2:
111    {
112      if (statep == 1) count--;
113      if (statep == 3) count++;
114      break;
115    }
116    case 3:
117    {
118      if (statep == 2) count --;
119      if (statep == 4) count ++;
120      break;
121    }
122    default:
123    {
124      if (statep == 1) count++;
125      if (statep == 3) count--;
126    }
127  }
128  statep = state;
129
130 }
131
132 void Bchange()
133 {
134   A = digitalRead(2);
135   B = digitalRead(3);
```

```

137  if ((A==HIGH)&&(B==HIGH)) state = 1;
138  if ((A==HIGH)&&(B==LOW)) state = 2;
139  if ((A==LOW)&&(B==LOW)) state = 3;
140  if ((A==LOW)&&(B==HIGH)) state = 4;
141  switch (state)
142  {
143      case 1:
144      {
145          if (statep == 2) count++;
146          if (statep == 4) count--;
147          break;
148      }
149      case 2:
150      {
151          if (statep == 1) count--;
152          if (statep == 3) count++;
153          break;
154      }
155      case 3:
156      {
157          if (statep == 2) count --;
158          if (statep == 4) count ++;
159          break;
160      }
161      default:
162      {
163          if (statep == 1) count++;
164          if (statep == 3) count--;
165      }
166  }
167  statep = state;|
168  }

```

Anexo 6: Especificaciones técnicas del sensor de presión MPL3115A2

Table 2. Mechanical Characteristics @ $V_{DD} = 2.5V$, $T = 25^{\circ}C$ unless otherwise noted⁽¹⁾

Ref	Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Sensor							
1	P_{FS}	Measurement Range	Calibrated Range	50		110	kPa
			Operational Range	20		110	kPa
2		Pressure Reading Noise	1x Oversample ⁽²⁾		19		Pa RMS
			128x Oversample ⁽²⁾		1.5		Pa RMS
3		Pressure Absolute Accuracy	50 to 110 kPa over $0^{\circ}C$ to $50^{\circ}C$	-0.4		0.4	kPa
			50 to 110 kPa over $-10^{\circ}C$ to $70^{\circ}C$		± 0.4		
4		Pressure Relative Accuracy	Relative accuracy during pressure change between 70 to 110 kPa at any constant temperature between $-10^{\circ}C$ to $50^{\circ}C$		± 0.05		kPa
			Relative accuracy during changing temperature between $-10^{\circ}C$ to $50^{\circ}C$ at any constant pressure between 50 kPa to 110 kPa		± 0.1		
5		Pressure/Altitude Resolution ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾	Barometer Mode	0.25	1.5		Pa
			Altimeter Mode	0.0625	0.3		m