

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBAS DE
PANELES EÓLICOS MODULARES CON
APLICACIONES DE LA BIOMIMÉTICA PARA
PERFILES ALARES**

MATÍAS ERNESTO BARRIOS MARTÍNEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. ALEX FLORES M.

PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. CHRISTOPHER COOPER V.

JUNIO 2018

AGRADECIMIENTOS

Muestro mi profundo agradecimiento a Pedro Ruiz, Jacqueline Souza, Daniel Galleguillos, Israel Briceño y a los profesores Alex Flores y Christopher Cooper por los conocimientos y la excelente disposición a enseñar y compartir su tiempo.

DEDICATORIA

A las personas que siguen curiosas y buscan las respuestas en la ciencia. A todos aquellos que los sorprende la naturaleza y viven con una pasión interminable.

RESUMEN

Este trabajo de título se centra en el aprovechamiento y maximización que existe en la transformación desde energía eólica a energía mecánica. A través del diseño óptimo de un perfil alar para condiciones especiales de un régimen de viento, se intenta mejorar la eficiencia en la transformación energética que obtendría dicho elemento gracias a la incorporación de sistemas encontrados en la naturaleza (biomimética).

En el marco teórico se observa desde la oscilación vertical de las aletas de las mantarrayas hasta el esparcimiento de semillas, pasando por los tubérculos de las ballenas jorobadas, el vuelo del albatros y un modelo de estudio llamado FishBAC centrado en las oscilaciones de la espina dorsal de los peces.

Centrados en el objetivo de maximizar la sustentación y minimizar el arrastre, se diseña un perfil alar, se imprime con tecnología 3D en plástico ABS y luego, se realizan pruebas en el túnel de viento del laboratorio de termofluidos de la Casa central de la UTFSM.

Se observa que incorporar protuberancias y añadir curvatura en la cuerda del perfil, sí mejoran el desempeño de la sustentación del perfil.

ABSTRACT

This title work focuses on the use and maximization that exists in the transformation from wind energy to mechanical energy. Through the optimal design of a wing profile for special conditions of a wind regime, we try to improve the efficiency in the energy transformation that this element would obtain thanks to the incorporation of systems found in nature (biomimicry).

In the theoretical framework it is observed from the vertical oscillation of the fins of the stingrays to the spreading of seeds, passing through the tubers of the humpback whales, the flight of the albatross and a study model called FishBAC focused on the oscillations of the spine of the fish.

Focused on the goal of maximizing lift and minimize drag, an alar profile is designed, is printed on ABS plastic and then, tests are performed in the wind tunnel of the thermal fluid laboratory of the UTFSM.

It is observed that incorporating protuberances and adding curvature in the profile rope, does improve the performance of the profile lift.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	1
Dedicatoria.....	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Referencias de siglas y abreviaturas.....	7
Introducción.....	9
Desarrollo del tema	
1. Marco de referencias.....	11
1.1. Antecedentes.....	11
1.2. Marco conceptual	33
Ecuaciones de capa límite:	40
Continuidad	40
Momento en x	41
Momento en y	41
Energía.....	41
Presión	41
Entalpía	41
2. Hipótesis	42
3. Modalidad de trabajo.....	42
4. Estudio de modelos.....	43
5. Factibilidad técnica.....	47
5. 1 Materiales.....	47
5.2 Equipos	48
6. Variables aerodinámicas e instrumentación.....	49
7. Túnel de viento.....	51

Ajuste a cero y calibración.....	55
8. Diseño	60
9. Prototipado.....	70
10. Experimentos en túnel de viento	72
Conclusiones.....	85
Referencias.....	89
Anexos.....	91

REFERENCIA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

- Stall: Efecto de entrada en pérdida de sustentación
- Strakes: dispositivos de extensión del borde de ataque en aviones
- CNC: Control Numérico por Computadora, mencionado generalmente como máquina de corte en madera
- FishBAC: Fish Bone Active Camber
- XFLR5: Herramienta de software computacional para el análisis de perfiles alares
- OPENFOAM: Código de dinámica de fluidos computacional de alta fidelidad
- INVENTOR: Software de diseño ingenieril
- ABS, PLA: Plásticos utilizados en impresión 3D
- M5: Unidad métrica 5 milímetros
- KRAKEN: Empresa de servicios de impresión 3D
- VLM: Vortex Lattice Method, método de cálculo en simulaciones aerodinámicas
- TL: Tubérculos Largos
- TC: Tubérculos Cortos
- 4TL: Cuatro Tubérculos Largos
- 4TC: Cuatro Tubérculos Cortos
- 7TL: Siete Tubérculos Largos
- 7TC: Siete Tubérculos Cortos
- PD1: Prototipo con desplazamiento de 10 mm
- PD2: Prototipo con desplazamiento de 20 mm
- FLEX1: Ensayo aerodinámico PD1
- FLEX2: Ensayo aerodinámico PD2
- LB: Línea Base
- SERVO: Servomotor
- CLARK, BAMBINO, AG, GOE, EPPLER, SEILING, NACA: Familia de perfiles alares utilizados en aeronáutica
- α : Ángulo de ataque

- μ : Viscosidad Cinemática
- ρ : Densidad
- F_L : Fuerza de sustentación
- F_D : Fuerza de arrastre
- v : Velocidad
- V_∞ : Velocidad de corriente de aire libre
- kgf : Unidad de medida Kilogramo Fuerza
- MPa : Mega Pascal
- c : Cuerda perfil alar.
- b : Longitud transversal perfil alar.
- Re : Reynolds.
- A : Área.

INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos es una de las ramas de la física que se estudia en ingeniería mecánica, y esta, busca comprender el comportamiento de las interacciones en los fluidos. Entender y estudiar las fuerzas que se generan entre la interacción entre un cuerpo sólido y un fluido, es de vital importancia para cientos de aplicaciones industriales, tales como aeronáutica, ventilación mecánica, meteorología y en especial, la generación de energía.

Se realiza una investigación que comprende el marco teórico y el marco conceptual. Cuando ya se hubo investigado los potenciales sistemas naturales de eficiencia, se procede a estudiar la factibilidad técnica del elemento a producir. Luego, se diseña y fabrica el prototipo que sirve como base de estudio para las hipótesis antes definidas. El prototipo y sus modificaciones son sometidos a pruebas en un túnel de viento, con el fin de encontrar puntos de máximo aprovechamiento energético en un sistema mecánico. Luego, se analizan los resultados, se obtienen conclusiones, y se presentan recomendaciones para trabajos posteriores.

Problema

Existe la necesidad de mejorar el diseño de los actuales equipos de generación de energía eólica, con el propósito de reducir el arrastre aerodinámico que sufren los elementos mecánicos que cumplen esta tarea, y de esta manera, aumentar la eficiencia con la cual se obtiene energía.

El escaso conocimiento sobre el fundamento aerodinámico e hidrodinámico de los animales que se encuentran en la naturaleza, llama a investigar sobre el efecto físico de sus cuerpos en torno a fluidos viscosos.

Considerando lo anterior, resulta relevante estudiar dicho comportamiento con el fin de optimizar la tecnología eólica, planteando el diseño de un generador eólico modular inspirado en características biomiméticas.

Esta investigación se centra en el estudio del comportamiento de las fuerzas generadas en perfiles alares y variaciones rediseñadas en base a la biomimética, analizando la separación de la capa límite producida por el efecto estela.

Objetivos

1. General:

Determinar un punto de máxima eficiencia para el aprovechamiento de la energía eólica en la aplicación de un perfil alar inspirado en la biomimética, como elemento base de un generador eólico modular.

2. Específicos:

- Estudiar los diseños convencionales de los generadores eólicos modulares.
- Estudiar y definir los parámetros fundamentales del comportamiento aerodinámico de diferentes especies animales y vegetales, que les permiten contrarrestar los efectos de la estela turbulenta en sus perfiles alares naturales para distintos regímenes de viento.
- Diseñar y estimar el rendimiento de un perfil aerodinámico inspirado en conceptos de la biomimética, como herramienta para optimizar los parámetros constructivos.
- Fabricar y probar experimentalmente el perfil aerodinámico para evaluar y comparar su comportamiento con respecto a las simulaciones numéricas preliminares.
- Plantear el diseño de un sistema mecánico modular que genere energía eólica con la máxima eficiencia posible empleando este nuevo perfil aerodinámico.

DESARROLLO DEL TEMA

1. Marco de referencias

1.1. Antecedentes

A continuación, se presenta el trabajo de investigación de la literatura existente sobre biomimética y su aprovechamiento en ingeniería. El estudio comprende los sistemas aplicados por aves, mamíferos y plantas, que fueron evolucionando por millones de años, hasta alcanzar características únicas.

El viaje en el estudio de caracteres naturales que se enfrenten a condiciones críticas en la mecánica de fluidos remonta a miles de años, y empieza con la construcción de las primeras balsas que el hombre utiliza para transportarse y cazar animales marinos. Aunque no fue la primera herramienta que se imita basándose en la naturaleza, es la primera que cumple el rol de mirar hacia el comportamiento que tienen los cuerpos físicos en interacción con los fluidos. Esta travesía toma un nuevo rumbo cuando Leonardo Da Vinci idea distintos artefactos voladores inspirados en murciélagos y aves, que buscan llevar al hombre a su sueño más anhelado, la posibilidad de volar. La naturaleza es una fuente ilimitada de recursos de estudio por la cantidad de especies con una evolución específica en su entorno, y por eso, en este estudio, se decide tomar como cota inferior los trabajos contemporáneos basados en el área del desarrollo científico aplicado.

Se inicia la búsqueda de estos caracteres con el interés de mejorar la eficiencia de aeronaves con hipótesis basadas en biomimética, en particular, los tubérculos que poseen las ballenas jorobadas en la parte delantera de sus aletas pectorales (Fig. 1.1).

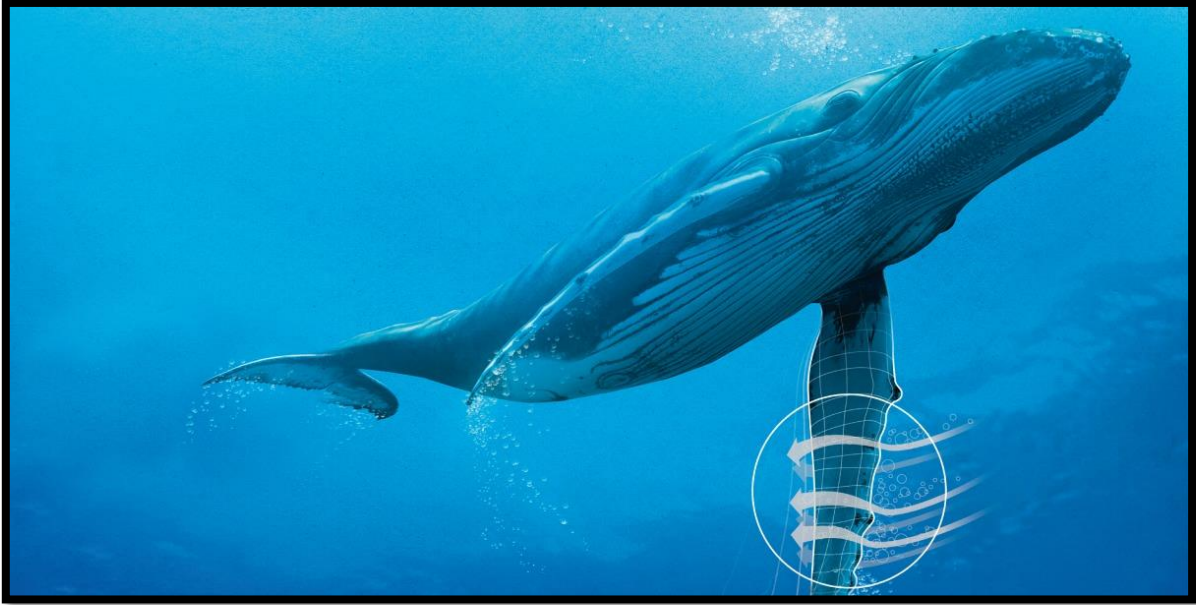


Figura 1.1: Ballena Jorobada, en detalle, los tuberculos de sus aletas pectorales.

En el estudio desarrollado en 2007 por Debra Rich, titulado, “Biomimética de Aeronaves” se prueban cuatro modelos del perfil alar “Clark Y14” (Fig. 1.2), comúnmente utilizado en aeronaves. Uno de los perfiles se mantuvo inalterado, mientras que los otros tres perfiles se modificaron con tubérculos en la región de curvatura del borde de ataque, con el motivo de estudiar el comportamiento de las fuerzas de arrastre y sustentación al añadir estas protuberancias (Fig. 1.3). Estos perfiles se ensayan en un túnel de viento a diferentes velocidades y ángulos de ataque, para luego ser comparados y evaluar la eficiencia bajo efectos de desprendimiento de capa límite.



Figura 1.2: Vista lateral del perfil alar Clark Y-14

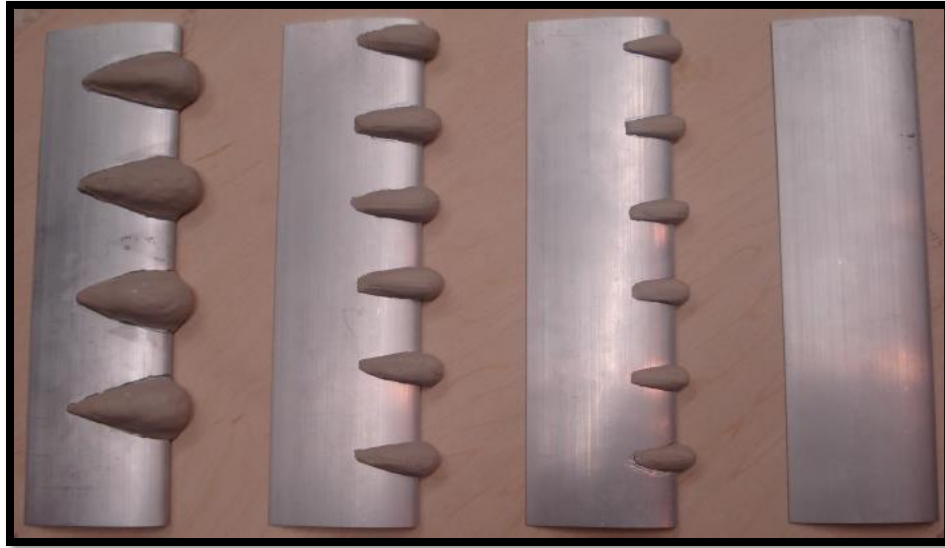


Figura 1.3: Perfiles alares con modificaciones

La hipótesis del trabajo busca demostrar que dichas protuberancias canalizan el agua y dividen el flujo en múltiples vórtices creando turbulencia. Este efecto le proveería a la ballena jorobada una menor resistencia hidrodinámica y le permitiría girar sus aletas en ángulos más pronunciados.

Los resultados del estudio [1] demuestran que los tubérculos mejoran levemente el desempeño de los perfiles alares, y que el tamaño de estos cuerpos es factor relevante en la mejora de la eficiencia, siendo los tubérculos de menor tamaño los que entregan una reducción de la fuerza de arrastre de un 17.47% y un aumento en el ángulo crítico de ataque de un 12.5%. Estos resultados fueron primera fuente de inspiración para trabajos posteriores.

Los fluidos reales siempre experimentan al moverse ciertos efectos debidos a fuerzas viscosas. Así, la viscosidad es responsable de las fuerzas de fricción que actúan entre las capas del fluido. En los líquidos, esta surge de las fuerzas de cohesión entre las moléculas de la sustancia. Este enfoque, lleva a Frank Fish (profesor en el departamento de biología de “West Chester University”, estados unidos), en el año 2009, a la investigación de aplicaciones que pretenden aumentar la eficiencia de la tecnología mecánica en contacto con fluidos viscosos. En su estudio [2], recopila una síntesis de oportunidades de ingeniería, pensando

en la mecánica y cinemática de las aletas del delfín, la mantarraya y la ballena jorobada.

El delfín y la mantarraya nadan bajo el principio de propulsión por oscilación vertical, el empuje que genera el movimiento oscilatorio de sus aletas se transmite en dirección perpendicular al desplazamiento de estas. En este movimiento, el ángulo de ataque de las aletas pectorales en la mantarraya (Fig. 1.4) y dorsal en el delfín, varía desde ángulos positivos a negativos respecto al eje vertical.

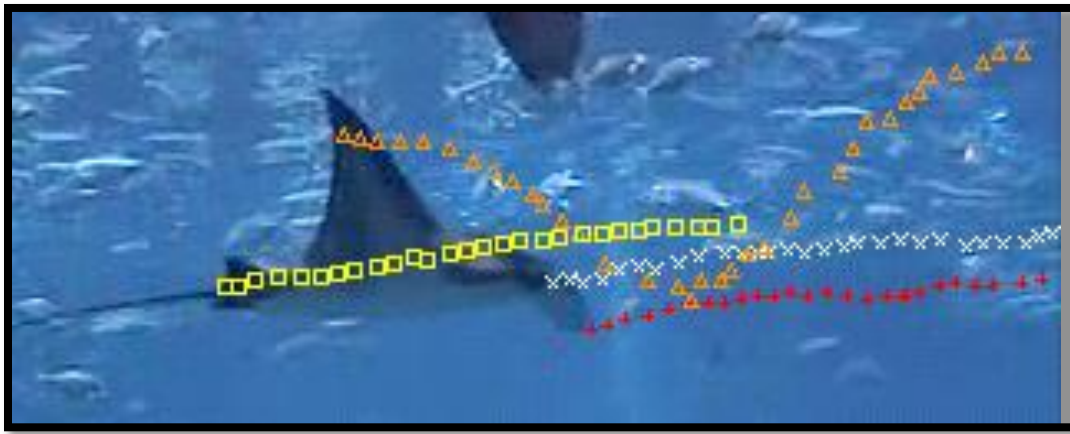


Figura 1.4: Movimiento de propulsión oscilatorio de la mantarraya

Aquel movimiento genera el impulso gracias a una componente inestable de fuerza de sustentación, “provocando un control y producción de vorticidad, el cual es el elemento clave de uno de los aspectos detrás del alto coeficiente de sustentación generado por los sistemas biológicos” [3]. Experimentos realizados con perfiles alares basados en estas características biomiméticas, han demostrado que las condiciones óptimas para la producción de empuje, es cuando la oscilación del perfil alar coincide con la máxima amplificación de perturbaciones en la estela [4].

No solo el aumento en sustentación es un factor clave para mejorar la eficiencia de los equipos de propulsión, la geometría de los perfiles en sus tres dimensiones es clave para el control de la vorticidad. El diseño del perfil cónico con punta en flecha (morfología de la mantarraya) reduce un 8.8% el arrastre inducido, comparado con un perfil con forma elíptica vista en planta [5]. La forma en media luna (aleta dorsal delfín) presenta un 13% más de eficiencia de propulsión que un

perfil rectangular bajo condiciones de alta carga [6]. La flexibilidad de las aletas del delfín y de la mantarraya y su efecto hidrodinámico es una variable que se ha empezado a estudiar más detalladamente en aplicaciones ingenieriles de propulsión, estudios recientes demuestran que el aleteo de la cuerda en perfiles flexibles aumenta hasta en un 36% la eficiencia de propulsión en comparación con un perfil rígido [7].

La ballena jorobada sigue estando en la mente de científicos, y llama la atención por una característica muy especial, cuenta con la aleta más larga de todos los cetáceos [8], la cual presenta tubérculos que le proveen de un principio hidrodinámico ya demostrado, la capacidad de posponer el desprendimiento de la capa limite, evitando el efecto “Stall” o “entrada en pérdida”, esto, le permite maniobras de caza particulares. Estos tubérculos se presentan en forma regular en cada 7-9% del largo de la aleta. Se puede comparar la función que cumplen los tubérculos con la obtenida por los “Strakes” en las aeronaves, estos, son elementos rígidos generadores de vórtices que cambian la característica del flujo, debido a que generan un intercambio de momento dentro de la capa limite que la mantiene unida sobre la superficie del ala, previniendo así, la pérdida de sustentación.

En experimentos diseñados en túnel de viento, se generaron evidencias para demostrar que es correcta la hipótesis de que los tubérculos tienen el rol de retrasar el ángulo al cual se produce el desprendimiento de la capa limite, y aumentar la fuerza de sustentación. Las pruebas se realizan con dos modelos a escala ($\frac{1}{4}$) de la aleta pectoral de la ballena, basado en el perfil NACA 0020, uno con modificaciones (tubérculos) y otro sin ellas (Fig. 1.6, D). El modelo se construye a partir de policarbonato en una maquina CNC. El ensayo se realiza variando el ángulo de ataque de los perfiles, a una velocidad de 2.6 [m/s] ($\frac{1}{2}$ de la velocidad promedio de una ballena).

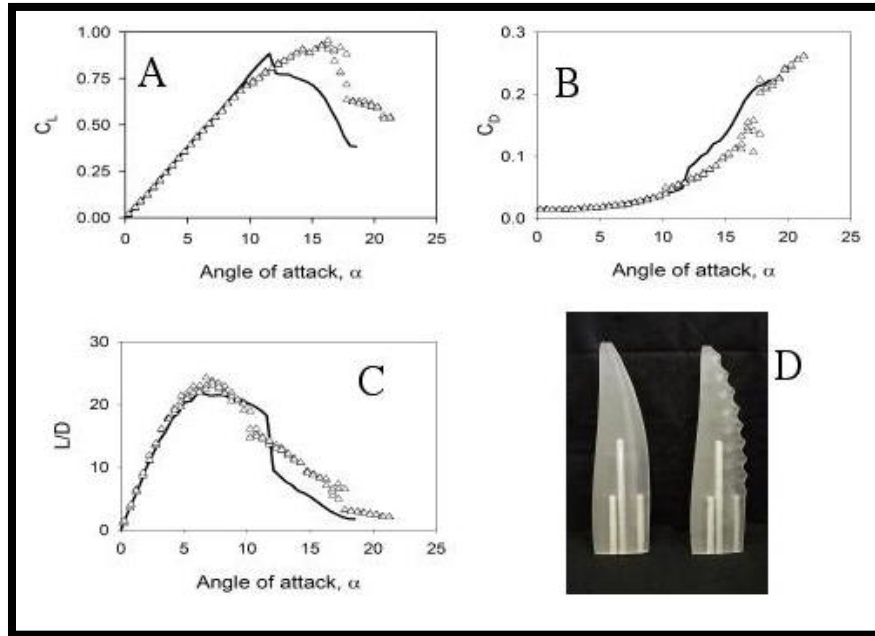


Figura 1.5: Gráficos de coeficiente de sustentación, de arrastre y la relación entre ambas fuerzas en función del ángulo de ataque.

En las gráficas obtenidas (Fig. 1.5 A, B, C), los triángulos representan la aleta con características biomiméticas, mientras que la línea continua representa a la aleta sin modificar. De las gráficas se observa que el ángulo al cual se presenta el efecto de desprendimiento en el perfil modificado, aumenta en un 40% en comparación con el perfil sin modificar, también, que disminuye la fuerza de arrastre hasta en un 30% entre 12 a 17° en el perfil con modificaciones. Otro dato que vale la pena mencionar y que no se observa en estudios anteriores, es la mejora de aproximadamente un 15% en la sustentación máxima, a los 15°.

El año 2012 es un gran año para el avance de la biomimética de perfiles alares. El avance en simulaciones de dinámica de fluidos computacionales (CFD) permite realizar investigación desde el ordenador, y el acceso a impresión 3D que permite el prototipado rápido, impulsan el desarrollo de modelos más económicos y cercanos a las hipótesis que se desean comprobar. Este año, J. M. Cimbala de Penn State University analiza el efecto de arrastre y sustentación en un perfil NACA 0021 con y sin tubérculos (Fig. 1.6), para una variación de 0 a 30 grados de ángulo de ataque. Las mediciones se realizan en intervalos de 2.5° a un flujo libre de velocidad de 3.5 [m/s].

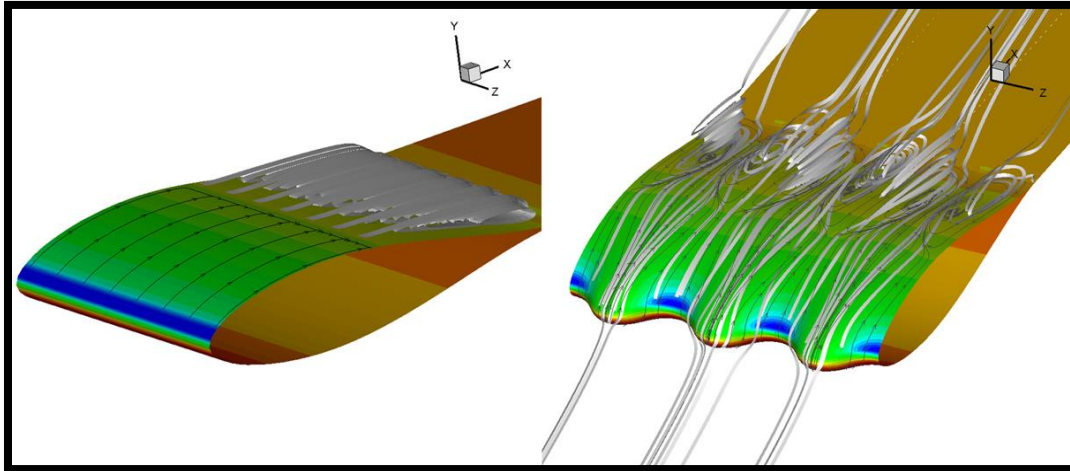


Figura 1.6: Flujo simulado en perfil alar sin modificación (izquierda) y modificado (derecha)

Del estudio se obtiene que, el perfil modificado presenta un menor coeficiente de arrastre (C_D) para el mismo ángulo de ataque en comparación de perfil sin modificar (Graf. 1.1), y se hace ver desde 17.5° hasta 27.5° de ataque, luego, se converge a resultados similares. También, se observa un aumento del coeficiente de sustentación (C_L) para el perfil modificado que va desde los 7.5° hasta los 30° (Graf. 1.2), el máximo C_L se encuentra a los 10° , superando al perfil sin modificaciones en aproximadamente 15%, se registra una diferencia máxima de un 19 veces la fuerza de sustentación generada a un ángulo de ataque de 15° , este resultado se debe al efecto de entrada en pérdida que sufre la fuerza de sustentación del perfil sin modificar. Con estos resultados, se permite comprobar nuevamente que los tubérculos modifican el ángulo al cual el perfil entra en pérdida de sustentación.

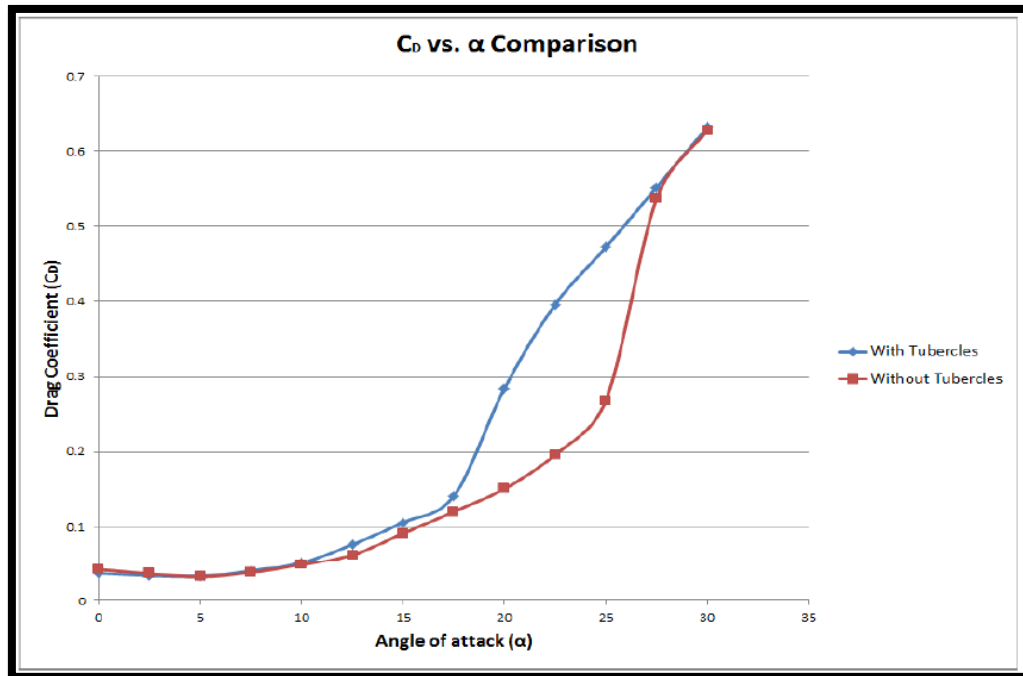


Gráfico 1.1: Coeficiente de arrastre v/s ángulo de ataque.

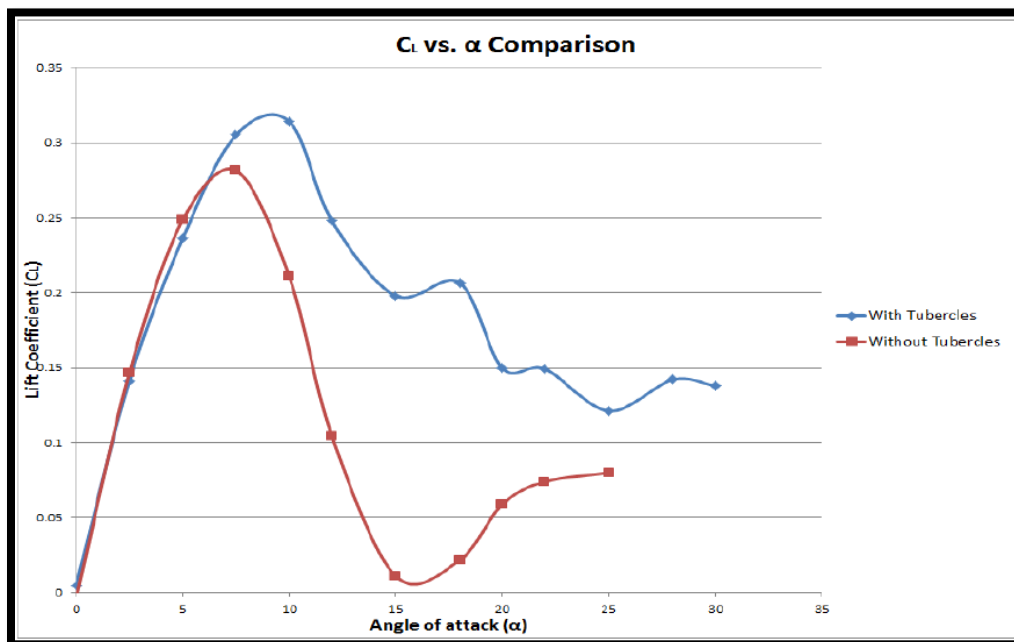


Gráfico 1.2: Coeficiente de sustentación v/s ángulo de ataque.

En el mismo año, Benjamin K. S. Woods de Swansea University, Georgia USA, realiza una investigación preeliminar en el modelo “Fishbone Active Camber Concept” (FishBAC) [20]. Esta nueva estructura morfológica de perfiles alares se inspira en sistemas animales voladores y marinos que se caracterizan por mantener la curvatura del perfil en movimiento oscilatorio, lo cual, mejora las propiedades aerodinámicas o hidrodinámicas (según corresponda al animal) del perfil (Fig. 1.7).

El FishBAC se basa en un núcleo estructural con un elastómero tensado que funciona a modo de piel y que cubre la zona media del perfil. Este diseño permite producir deflexiones con mínimas fuerzas de accionamiento y bajos niveles de tensión interna, mejorando simultáneamente la rigidez.

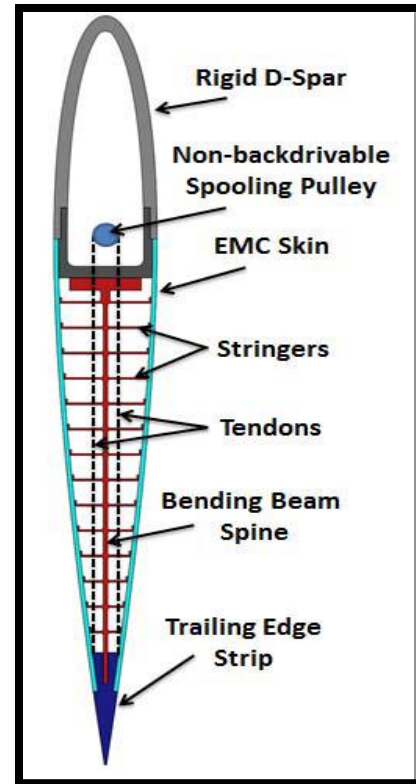


Fig. 1.7: FishBAC concept

El sistema de tracción del tendón, lo mueve un accionador que se ubica en la sección central. Los tendones son dirigidos por la polea de arrollamiento y conectan al accionador con el borde de salida del perfil a través de un mecanismo no reversible. El concepto de una columna delgada trabajando en flexión, con largueros similares a las costillas de un pescado crea una anisotropía de una manera sencilla y eficiente.

Woods realiza un análisis aerodinámico preliminar con el perfil NACA 0012 en el software XFLR5, prueba con dos variaciones respecto a este perfil, la primera con un alerón y la segunda con una morfología FishBAC (Fig. 1.8). Los ensayos se realizan a $Re = 1 * 10^6$. Se registra un aumento considerable en el coeficiente de sustentación (C_L) para la configuración FishBAC y NACA 0012 con alerón en comparación del perfil sin modificaciones (Graf. 1.3), también, se obtuvo una mayor razón C_L/C_D para el perfil FishBac con un máximo en $C_L = 1$ (Graf. 1.4).

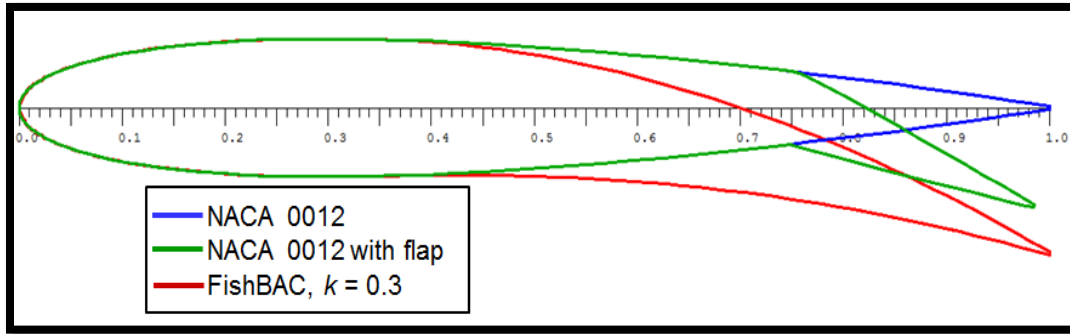


Figura 1.8: Perfiles NACA 0012, NACA 0012 con alerón y FishBAC

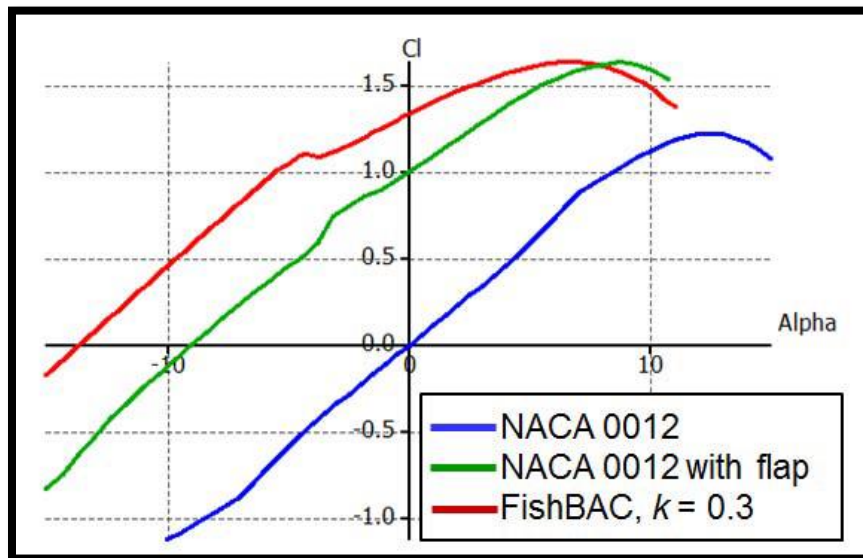


Gráfico 1.3: Coeficiente de sustentación v/s ángulo de ataque modelos NACA y FishBAC

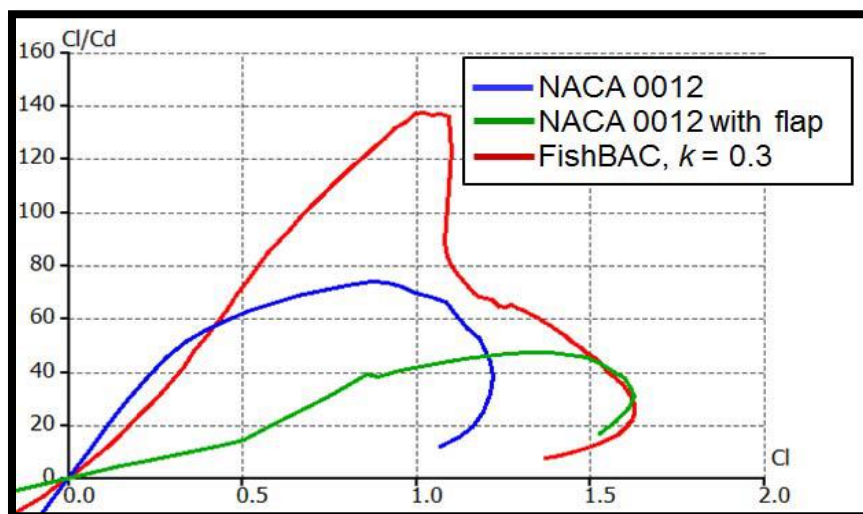


Gráfico 1.4.: Eficiencia aerodinámica v/s ángulo de ataque para modelos NACA y FishBAC

En el mismo año, B. Woods junto a O. Bilgen y M. I. Friswell, avanzan el trabajo anterior y presentan investigaciones experimentales sobre las propiedades aerodinámicas de la estructura Fish Bone Active Camber [21]. También, se realizan avances en las propiedades y características estructurales del concepto.

El núcleo de la estructura esquelética se inspira en la anatomía de los peces. La estructura está compuesta por una viga central o "columna vertebral", con una serie de largueros o "costillas de pez" que se ramifican para dar soporte a la piel. La estructura esquelética provee una alta anisotropía, con una baja rigidez a la flexión en sentido horizontal de la cuerda, pero una alta rigidez de flexión en sentido vertical.

Los elastómeros son capaces de concentrar de un 4-10% de deformación plástica con la mínima absorción de energía, esto, le entrega al perfil una capa exterior flexible. La pre-tensión se aplica por dos motivos, gracias a este proceso la superficie inferior que normalmente estaría bajo compresión, nunca deje la tensión y de esta forma eliminar el pandeo, y, en segundo lugar, la tensión aumenta la rigidez local fuera del plano. Para una delgada membrana elastomérica bajo carga de presión, las deformaciones fuera del plano son una importante consideración de diseño que reduce significativamente las flexiones entre los largueros.

El mecanismo de flexión funciona gracias un tendón antagónico acoplado a una polea. Un extremo de cada tendón está anclado a la parte rígida del borde de salida, y el otro extremo envuelve alrededor de una polea de bobinado montada dentro del larguero.

El modelo construido para las pruebas del ensayo no incluye todos los aspectos del diseño FishBAC, por temas constructivos prefieren realiza simplificaciones que cumplan con el mismo objetivo. La figura 1.9, muestra el diseño, el cual es accionado por un actuador ubicado en la zona fija delantera del perfil.

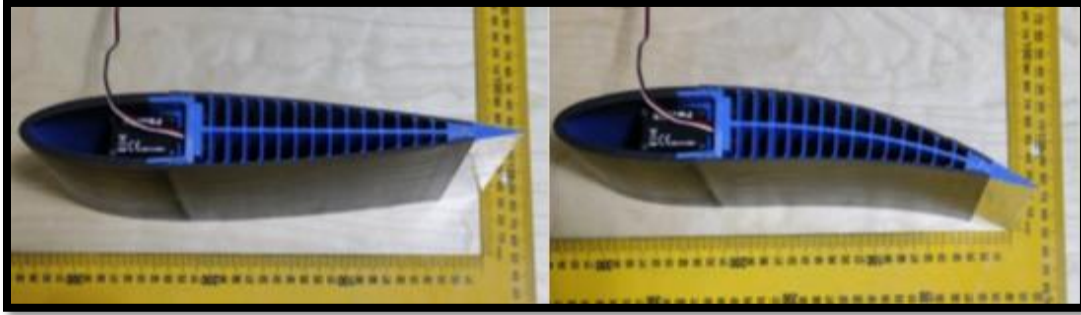


Figura 1.9: Modelo FishBAC construido para las pruebas

La experimentación de la investigación se lleva a cabo en el túnel de viento de la universidad de Swansea, y se prueba nuevamente con el perfil NACA 0012 como línea base y la estructura FishBAC como modelo comparativo, se miden los coeficientes de sustentación y arrastre para ambos cuerpos a bajas velocidades. Las pruebas se realizaron a una velocidad fija de 20 [m/s] con un número de Reynolds cercano a 400.000, se fue modificando el ángulo de ataque desde -15° hasta 15° , con un incremento de 0.5° . Los resultados de las pruebas se comparan con un perfil con alerón ajustable de modelo NACA 0012 con alerón al 25% de la cuerda (fig. 1.10).

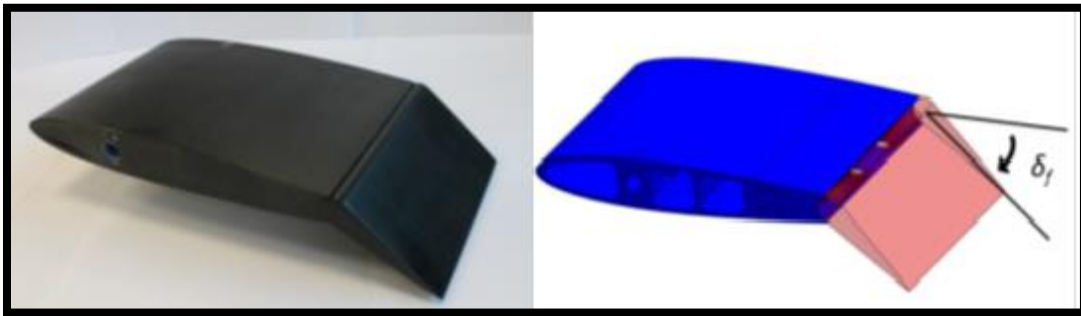


Figura 1.10: Modelo NACA 0012 con aleta

En estos ensayos no se detectan diferencias significativas en términos de sustentación aerodinámica para ambos perfiles. Para la mayor deflexión se encuentra un $\Delta C_l \approx 0,72$ y un coeficiente de elevación máxima de $C_{l, \text{máx}} \approx 1,07$ (Anexo C: Graf.1). Se observa que el perfil FishBAC genera menos arrastre en comparación del modelo con alerón, y que, el aumento del coeficiente de arrastre se observa con mayor relevancia a ángulos más elevados de deflexión, (Anexo C: Graf.2). Otro dato significativo, es que, la eficiencia aerodinámica del

perfil FishBAC es menos sensible al ángulo de ataque, mostrando una alta eficiencia de manera estable, en oposición al perfil con alerón, el cual muestra eficiencias más bajas y menos estables. El FishBAC retiene el 95% de su eficiencia aerodinámica máxima en un ángulo de ataque de $9,05^\circ$ ($\alpha = -1.75^\circ$ a $\alpha = 7.3^\circ$), mientras que el perfil aerodinámico con aleta tiene un rango correspondiente de sólo 3.6° ($\alpha = -0.1^\circ$ a $\alpha = 3,5^\circ$), (Anexo C: Graf.3).

Hasta ahora, las investigaciones se centran en estudiar la morfología de animales acuáticos, pero sin duda, existen millones de otros organismos en el mundo que su supervivencia depende de la interacción con otros fluidos, como el aire. Es el caso de las investigaciones de los próximos dos años, donde se analizan la dispersión de semillas y el vuelo del albatros respectivamente.

En la dispersión de semilla se encuentran estrategias que están caracterizadas por la robustez, adaptabilidad, inteligencia y la eficiencia de la energía y la masa. Estas cualidades se encuentran en los sistemas de ingeniería avanzada. Una gran familia de semillas se dispersa gracias al viento, para ello, existen tres métodos principales en los cuales se especializan que dependen en gran medida del clima de procedencia de la planta. En el primer caso se encuentra el vuelo rotatorio, en este tipo de vuelo importan variables como el ratio de rotación, descenso y el ángulo de paso en la estructura de la semilla. Un caso recurrente de estudio es la semilla de maple (Fig. 1.11) la cual presenta un aspa que le permite disminuir la aceleración de gravedad mediante la rotación al descender. En este régimen de vuelo, todas las fuerzas y momentos están balanceados y de esta forma se genera una rotación uniforme que permite el vuelo [10]. Una investigación reciente [11] revela un valor inesperado en la fuerza de sustentación, debido al perfil del cuerpo de la semilla, y a la formación de un vórtice estable en la borde de ataque.



Figura 1.11: Semilla de Maple

En el segundo caso se encuentra a semillas que planean, un caso común y reconocido es la semilla de *Alsomitra macrocarpa*, “esta semilla describe un alto desempeño de vuelo como planeador, posee una envergadura en promedio de 13 cm y maximiza su vuelo a los 12° de ángulo de ataque” [12], resultando en un mínimo ratio de descenso. Otro caso conocido es el de *Dioscorea japónica*. Se ha demostrado en experimentos en un túnel de viento [13], que esta semilla maximiza la relación sustentación-arrastre para una posición que va desde los 35 a 90° de ángulo de ataque con respecto a la corriente incidente.

El otro tipo de vuelo que vale la pena mencionar es el caso de las semillas de *Trogoon dubious* (izquierda) y *Taraxacum officinalis* (derecha) (fig. 1.12) son dos especies que poseen semillas con una forma característica similar a un paracaídas. La forma semiesférica le permite viajar de forma pasiva en las corrientes de viento y su potencial de dispersión está asociado a las condiciones climáticas del sector geográfico en la cual se encuentran.

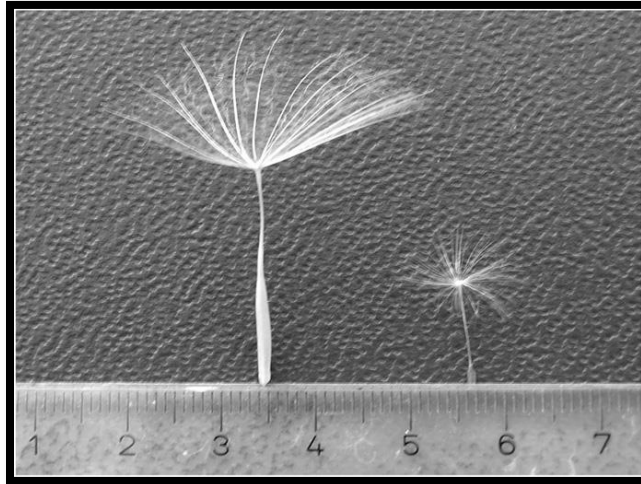


Figura 1.12: *Trogopon dubious* (izquierda) y *Taraxacum officinalis* (derecha).

Hay aves que destacan por ser viajeros de larga distancia, y entre ellos, el albatros (*Diomedidae*) sobresale por su habilidad de volar durante horas y horas sin un solo aleteo de sus alas. El albatros pertenece a una familia de aves marinas caracterizada por poseer una envergadura de hasta 3,4 metros, que les permiten moverse de forma eficiente en el aire utilizando el planeo dinámico, y así, cubrir grandes distancias con poco esfuerzo. Esto, se debe a que aprovechan los gradientes de velocidades que se originan sobre el nivel del mar.

“Estudiar la aerodinámica de vuelo del albatros, puede servir en el diseño de tecnología eólica que permita extraer la energía del viento en zonas con corrientes de aire altamente asimétricas como, en las cercanías de edificios de gran altura, en zonas montañosas y llanuras de baja altitud” [14].

En el estudio realizado el 2014 por G. Pfeifhofer y H. Tributsch, se estudia detenidamente la manera en que el albatros realiza sus maniobras de ascenso y descenso. En estas series de maniobras, inclina sus alas hacia arriba cuando en el aire existe una corriente en dirección a su vuelo, en la cual, aprovecha la energía cinética del viento y la convierte en energía potencial al ganar altura. Cuando el gradiente disminuye el albatros planea esperando hasta una nueva corriente, antes que ocurra, empieza un descenso en el cual gana energía cinética que sigue aumentando con el próximo gradiente. El albatros orienta sus alas

según la dirección de viento (Fig. 1.13) y de esta manera maximiza el producto de la velocidad relativa del viento y la velocidad del gradiente [14].

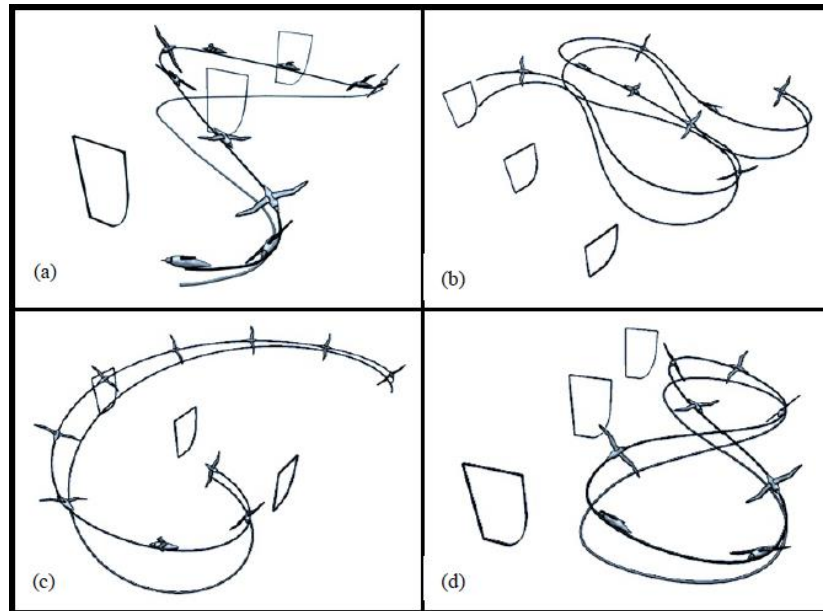


Figura 1.13: Maniobras de vuelo del Albatros.

La diferencia de velocidades entre la cara superior e inferior de un perfil alar depende de la curvatura de ambas superficies y esta es la variable crítica a la hora de generar sustentación [15]. El albatros al aprovechar el gradiente se adapta de mejor manera a la velocidad característica de estos gradientes (25 [m/s]) con un perfil menos curvado que otras aves (Fig. 1.14). Este comportamiento de vuelo le permite al ave migrar en la búsqueda de alimento.

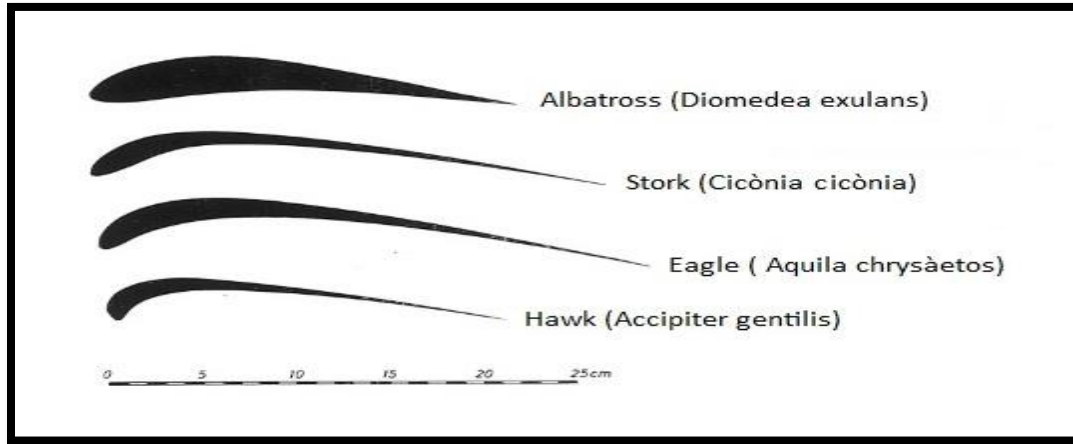


Figura 1.14: Perfil alar de algunas aves

En el estudio se abordan tres estrategias (Fig. 1.15, a, b, c) para abordar técnicamente la transformación de energía en los gradientes. En el primer caso, se observa un sistema en una dirección de movimiento, que aprovecha la energía del gradiente controlando el ángulo de ataque del perfil alar que se encarga de generar el movimiento de oscilación vertical (Fig. 1.16). El sistema incrementa el ángulo hasta cuando la relación sustentación versus arrastre se maximice y el perfil se encuentre en la zona superior, luego, lo disminuye hasta por debajo de la línea horizontal generando una sustentación negativa que obliga al perfil a desplazarse hacia abajo, luego repite el ciclo. El siguiente sistema posee dos o más perfiles aerodinámicos montados sobre un brazo en voladizo que le permita la rotación permanente (Fig. 1.17). La potencia generada por los movimientos de rotación puede ser extraída ya sea mecánicamente mediante un engranaje o por medio de un generador magnético. El último método para aprovechar la energía, incluye un movimiento variable, más complejo y mejor adaptado al vuelo del albatros, pero con más dificultad de llevarlo a un sistema mecánico.

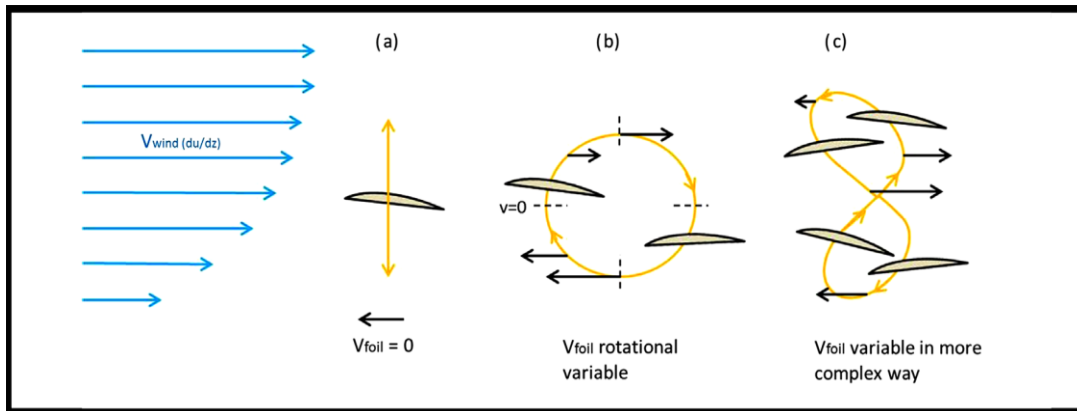


Figura 1.15: Esquemas de diseño, a) línea, b) rotatorio, c) variable

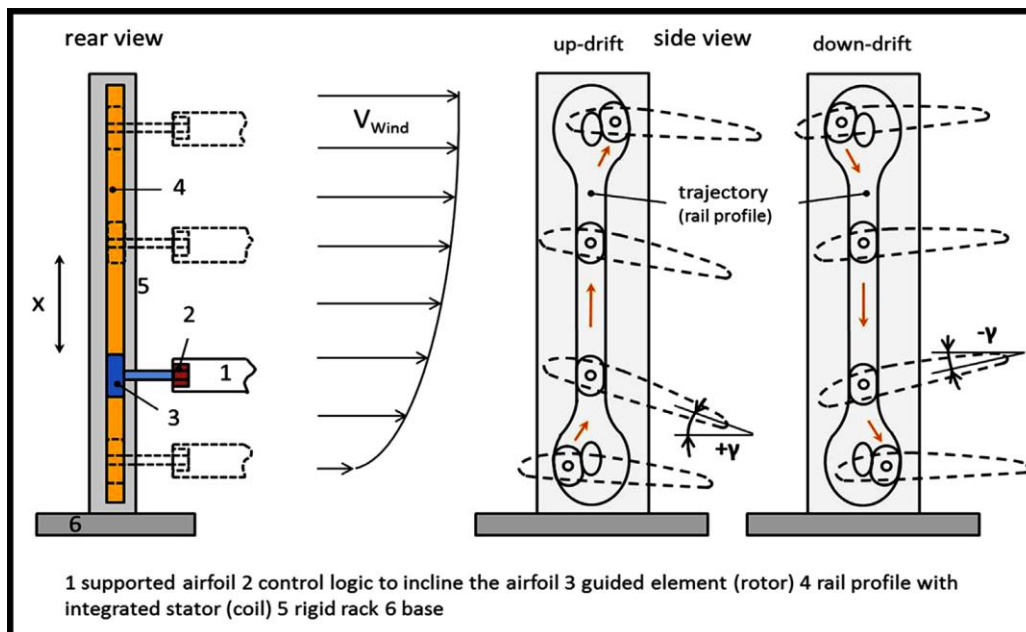


Figura 1.16: Diseño mecánico de un sistema eólico de movimiento vertical

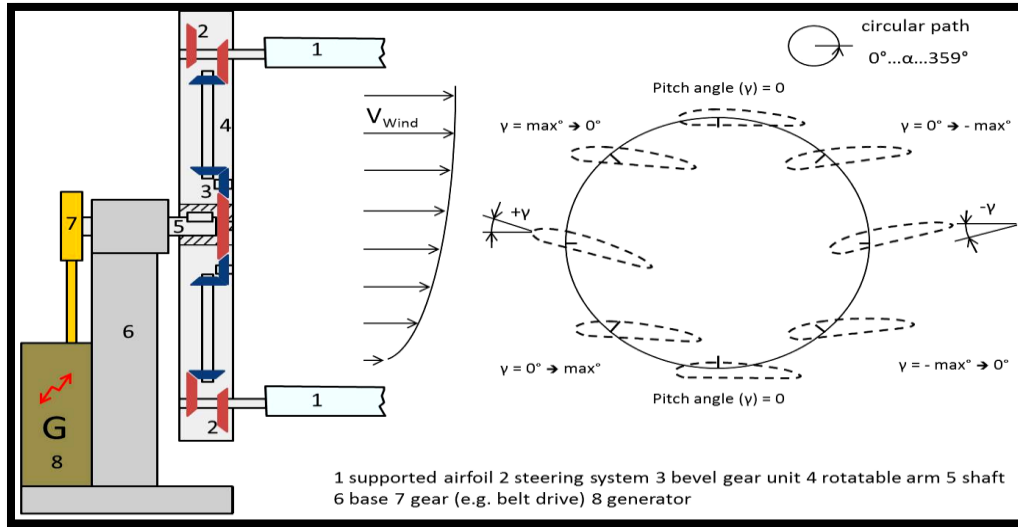


Figura 1.17: Diseño mecánico de un sistema eólico de movimiento rotatorio

El año 2014, el interés vuelve al concepto FishBAC. B. Woods junto a J. Fincham y M. Friswell, desarrollan un artículo que presenta una comparación de dos métodos de análisis aerodinámicos con el uso de software de dinámica de fluidos. Para ello, utilizan XFLR5, el cual posee un nivel de baja fidelidad, versus, OpenFOAM, un código de dinámica de fluidos computacional de alta fidelidad. Se compara una serie de análisis 2D que muestran el impacto del cambio de ángulo de ataque, la ubicación y el grado de la curvatura en la zona de salida del perfil, y el número de Reynolds en las predicciones.

El objetivo del análisis comparativo del estudio, es analizar la implementación de la curvatura potencial en el cuerpo de los perfiles, incluyendo el concepto FishBAC, y, además, establecer el rango general sobre el cual el software XFLR5 puede ser considerado suficientemente exacto en relación con una fidelidad superior como OpenFOAM.

Se toma como base un perfil alar NACA 0012 (Fig. 1.18). Una porción del borde de ataque permanece fija, y el inicio de la curvatura está dado por el parámetro X_s . La forma del perfil aerodinámico se construye superponiendo la distribución de espesor sobre una línea de curvatura definida paramétricamente. La tabla 1.1, muestra los parámetros del perfil y las características de las simulaciones.

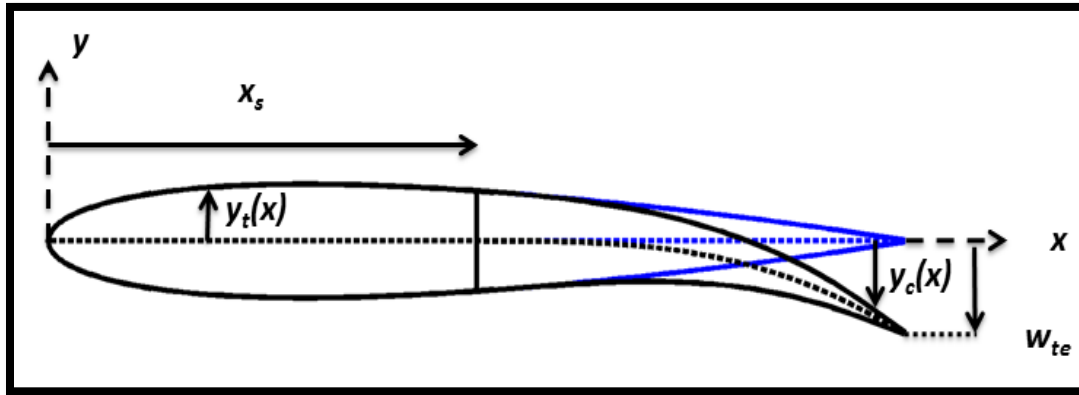


Figura 1.18: Superficie aerodinámica de estudio.

Parameter	Value	Units
baseline airfoil	NACA 0012	n/a
chord, c	300	mm
morphing start, x_s	[0.25, 0.5, 0.75]	n/a
max. deflection, w_{te}	[0, 0.05, 0.1]	n/a
angle of attack, α	[0 – 14]	deg
Reynolds #	[6.75e5, 1.35e6]	n/a
freestream velocity, V_∞	[34, 68]	m/s

Tabla 1.1: Características generales del perfil alar

Se detecta en los ensayos, que la ubicación inicial de la curvatura tiene un impacto en el rendimiento, entre más cercano al borde de salida empieza en los casos de estudio, más se reduce el arrastre. Se obtiene varias conclusiones que tienen coherencia con los estudios anteriores de B. Woods, por ejemplo, que el coeficiente de sustentación aumenta en cuanto crece w_{te} (deflexión máxima), al menos, hasta aproximadamente 14° de ángulo de ataque. También, que el coeficiente de arrastre aumenta en cuanto crece w_{te} .

La conclusión en los softwares, se reduce a que OpenFOAM es significativamente más costoso desde el punto de vista computacional que XFOIL., y que, La similitud en los resultados para ambos códigos es alta con todas las geometrías estudiadas para ángulos de ataque hasta aproximadamente 8° . Las diferencias

entre los métodos crecen en ángulos de ataque más grandes, pero siguen siendo razonablemente pequeñas en el rango estudiado (Fig. 1.22, 1.23, 1.24).

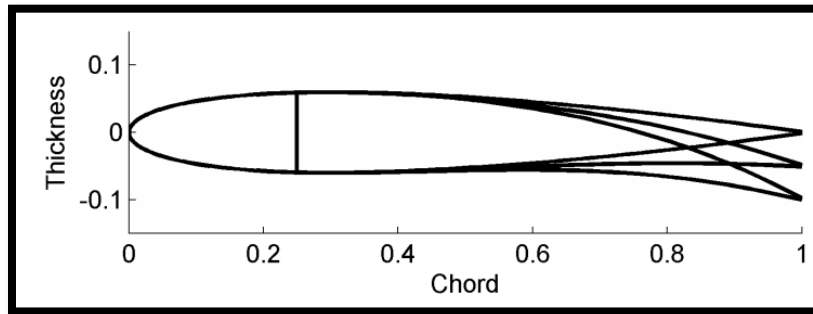


Fig. 1.19: Geometría de estudio, $X_s = 0.25$

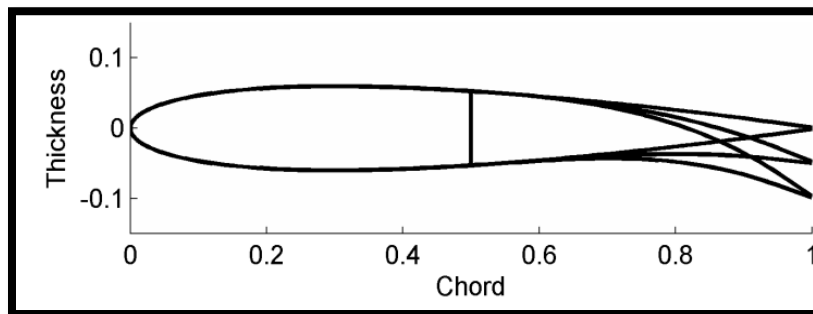


Fig. 1.20: Geometría de estudio, $X_s = 0.5$

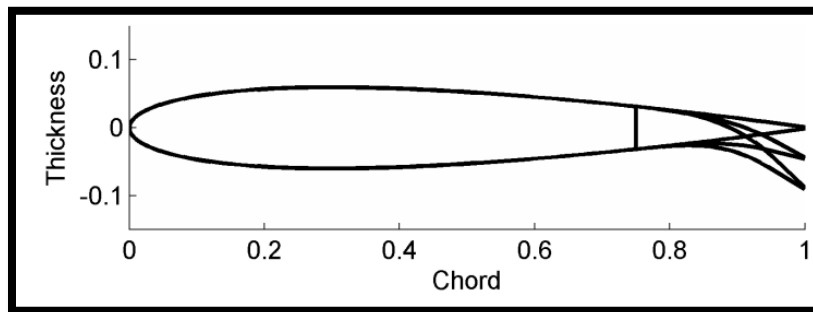


Fig. 1.21: Geometría de estudio, $X_s = 0.75$

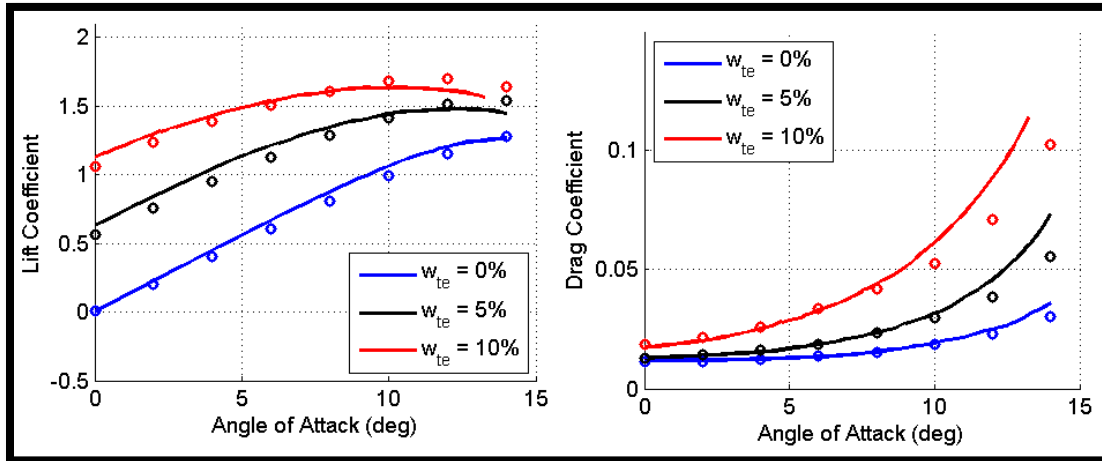


Figura 1.22: Coeficientes de arrastre y sustentación para $X_s = 0.25$ y $Re = 6.75e5$

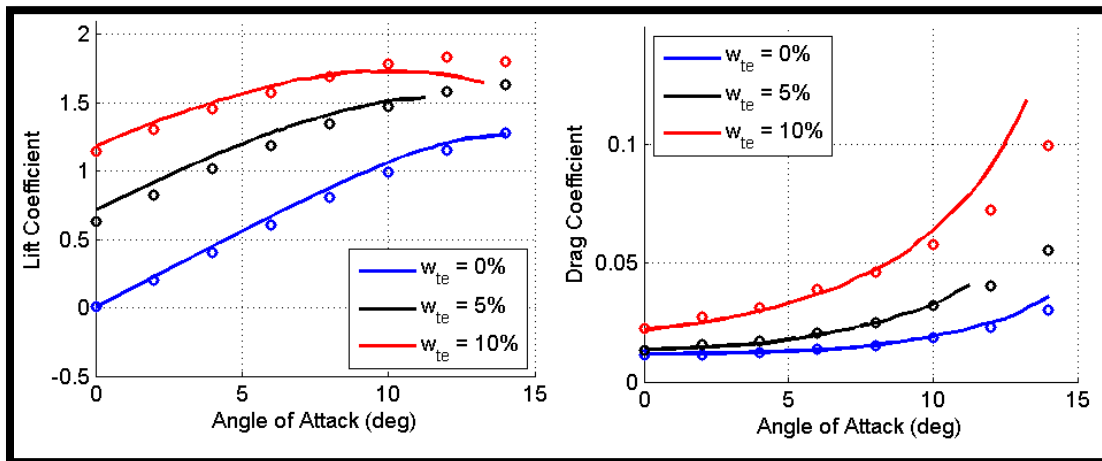


Figura 1.23: Coeficientes de arrastre y sustentación para $X_s = 0.5$ y $Re = 6.75e5$

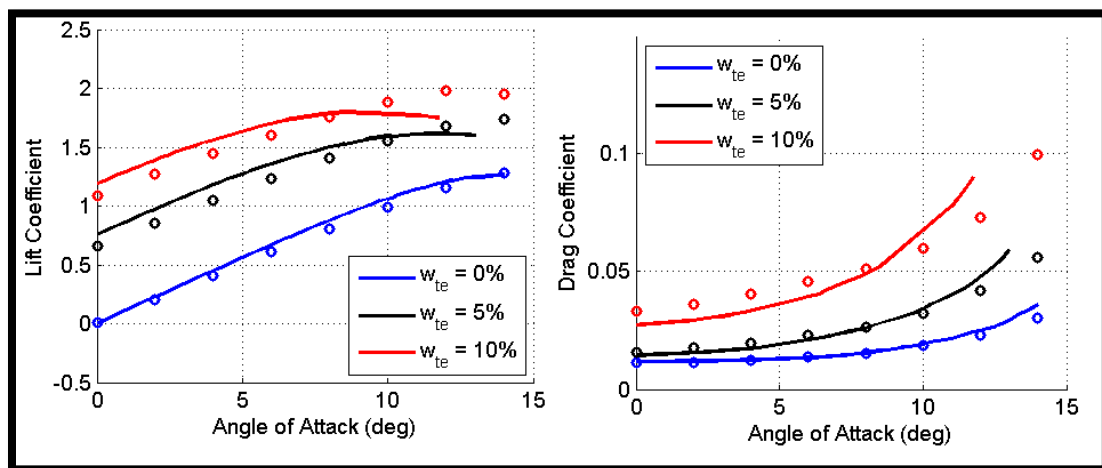


Figura 24: Coeficientes de arrastre y sustentación para $X_s = 0.75$ y $Re = 6.75e5$

1.2. Marco conceptual

Un perfil alar es la forma de un área transversal de un elemento, que al desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación. La mayor parte del desarrollo de perfiles en los Estados Unidos ha sido realizada a partir de 1929 por el Comité Nacional de Aeronáutica (NACA), que fue precursor de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Las variables geométricas de un perfil son cuatro (Apéndice A, Fig. 1):

1. Configuración de la línea de curvatura media.
2. Espesor.
3. Localización de espesor máximo.
4. Radio del borde de ataque.

Los perfiles NACA están clasificados en un catálogo, donde cada perfil viene identificado por las siglas “NACA” y un conjunto de dígitos que determinan sus dimensiones geométricas.

Fuerzas aerodinámicas:

Los cuerpos sumergidos en un fluido viscoso experimentan cuatro fuerzas principales cuando se encuentran en movimiento. Sustentación, arrastre, peso y empuje, estas fuerzas determinan la velocidad y aceleración del cuerpo, la última fuerza no necesariamente se encuentra en todos los casos.

A. Sustentación:

Es la fuerza en dirección perpendicular a la velocidad del flujo en un cuerpo que se desplaza en un fluido. Cuando las partículas que pertenecen a un fluido chocan con un cuerpo aerodinámico en movimiento, se generan diferentes efectos según la geometría del cuerpo. Para un perfil alar cuya superficie superior es curva y la inferior plana, las partículas que se desplazan por la parte superior deberán recorrer un camino más largo que las que se desplazan por la superficie inferior, por continuidad, las partículas de la parte superior deben viajar a una velocidad

mayor para reencontrarse con las partículas de la parte inferior, esta diferencia de velocidades genera una diferencia en las presiones en ambos costados (efecto Bernoulli), que crean una fuerza en dirección perpendicular al flujo.

El modelo matemático representa la fuerza como:

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

Dónde:

- F_L es la fuerza de sustentación en newtons
- ρ es la densidad del fluido, en [kg/m³]
- V es la velocidad, en [m/s]
- A es el área de referencia del cuerpo, representado por [m²]
- C_L es el coeficiente de sustentación

B. Arrastre

Es la fuerza en dirección opuesta al movimiento que sufre un cuerpo sólido cuando se enfrenta a un fluido. La fuerza de arrastre puede dividirse en tres componentes: el arrastre de fricción (efecto viscoso) y el arrastre de presión (efecto debido a la forma) y la resistencia inducida (efecto debido a la sustentación).

El modelo matemático representa la fuerza como:

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

Dónde:

- F_D es la fuerza de arrastre en newtons
- ρ es la densidad del fluido, en [kg/m³]
- V es la velocidad, en [m/s]

- A es el área de referencia del cuerpo, representado por $[m^2]$
- C_D es el coeficiente de arrastre

Números adimensionales: Una magnitud adimensional es una cantidad sin una dimensión física asociada. Estas magnitudes están involucradas particularmente en la mecánica de fluidos y en la descripción de fenómenos de transporte con el fin de realizar modelos teóricos y experimentales comparables y con resultados universales.

A. Numero de Reynolds

El número de Reynolds se puede definir como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido, relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo. Se expresa según:

$$R_e = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (3)$$

Dónde:

- R_e es un numero adimensional
- ρ es la densidad del fluido, en $[kg/m^3]$
- V es la velocidad, en $[m/s]$
- D es la longitud característica del sistema, en $[m]$
- μ es la viscosidad dinámica del fluido, en $[kg/m*s]$

B. Coeficiente de sustentación

Relaciona la sustentación generada por un cuerpo con la densidad del fluido que rodea el cuerpo, su velocidad y un área de referencia asociado. Dependen directamente del ángulo de ataque, aumentando hasta llegar a un punto máximo o a un ángulo de ataque crítico. Se expresa según:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho cv^2}$$

(4)

B. Coeficiente de arrastre

Relaciona el arrastre generado por un cuerpo con la densidad del fluido que lo rodea, su velocidad y un área de referencia asociado. Dependen directamente de la forma del cuerpo. Se expresa según:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (5)$$

Viscosidad: La viscosidad es el parámetro del fluido que controla el transporte de la cantidad de movimiento, es decir, determina la relación entre el esfuerzo o tensión local en un fluido en movimiento con la velocidad con que se produce la deformación.

En un fluido de viscosidad constante, el transporte de momento lineal entre capas de fluido está regulado por la ecuación:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (6)$$

Dónde:

- τ es la tensión tangencial ejercida en un punto del fluido, en $[N/m^2]$
- μ la viscosidad dinámica del fluido, en $[kg/m \cdot s]$
- $\frac{du}{dy}$ el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano

Capa Límite: La capa límite es una delgada zona del fluido cercana a la superficie de los cuerpos, en la cual se presentan variaciones de velocidad y donde se concentran los efectos viscosos. La capa límite puede ser laminar o turbulenta; aunque también pueden coexistir en ella zonas de flujo laminar y de flujo turbulento.

Considerando el flujo como un fluido viscoso incidente sobre una placa plana (Fig. 1.25), los efectos viscosos se encuentran contenidos dentro de una capa delgada adyacente a la superficie. Inmediatamente en la superficie, la velocidad de flujo es cero, esta es la condición de "no deslizamiento", además, la temperatura del fluido inmediatamente en la superficie es igual a la temperatura de la superficie.

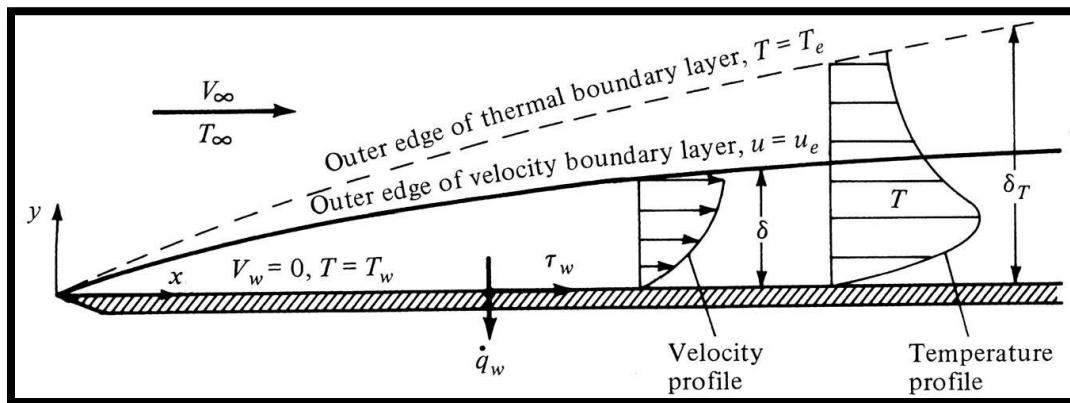


Figura 1.25: Perfiles del campo de velocidades en la capa límite (flujo en placa plana).

La magnitud de las fuerzas involucradas (sustentación y arrastre) dependerá de la forma que tome el flujo alrededor del cuerpo y por lo tanto de la forma del cuerpo, de las condiciones del flujo y de la posición relativa del cuerpo con respecto al flujo. La figura 1.26 muestra el flujo alrededor de 3 cuerpos de distintas formas [18].

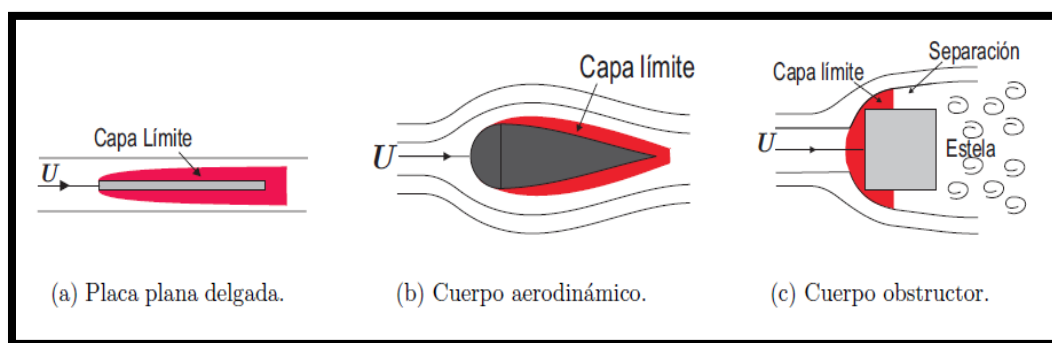


Fig. 1.26: flujo alrededor de 3 cuerpos de distinta forma

La influencia sobre el flujo para el caso de la placa plana paralela al flujo es mínima y las líneas de corriente tenderán a ser paralelas a la placa (Fig. 1.26, a). Alrededor de un perfil aerodinámico las líneas de corriente se cierran detrás del

cuerpo (Fig. 1.26, b). Alrededor de un cuerpo obstructor, por el contrario, las líneas de corriente no son capaces de cerrarse detrás del cuerpo generando detrás de este lo que se conoce como estela (Fig. 1.26, c).

Espesor de capa límite: Por encima de la superficie, la velocidad del flujo aumenta en la dirección “Y” hasta alcanzar la velocidad del flujo libre. Se define δ (espesor de la capa límite), como la distancia sobre la pared donde la velocidad es 0.99 la velocidad del flujo (V_∞). En cualquier posición “X” dada, la variación de velocidad ($u = u(y)$) entre $y = 0$ e $y = \delta$, se define como el perfil de velocidad dentro de la capa límite. El gradiente de velocidades es consecuencia del esfuerzo de corte provocados en la pared del cuerpo y están dado por la ecuación (6). [17]

Capa límite laminar: Las ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso en la capa límite son las ecuaciones de Navier Stokes. Consideraremos en el siguiente desarrollo un flujo bidimensional, permanente y laminar. Las ecuaciones de Navier Stokes para este caso son:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{dp}{dy} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

Hasta la fecha no se ha encontrado una solución analítica al sistema de ecuaciones anterior. Debido a esto se realizan una serie de aproximaciones para obtener un sistema de ecuaciones más simple. El sistema de ecuaciones anterior se reduce a:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

Capa límite turbulenta: La estructura de la capa límite turbulenta es muy compleja, irregular y aleatoria. No existe, por lo tanto, una solución exacta para el flujo en esta zona por lo que se recurre a aproximaciones y validación experimental. [18]

Separación del flujo: Para cuerpos distintos a una placa plana delgada existe una variación (magnitud y sentido) de la velocidad de la corriente libre alrededor del cuerpo y por lo tanto una variación de la presión. Como el flujo tiene que “abrirse” para que pase el cuerpo en la parte anterior de estos se producirá un aumento de la velocidad y una disminución de la presión. Pasado el punto de máximo espesor del cuerpo el flujo se expande nuevamente disminuyendo la velocidad y aumentando la presión.

Una consecuencia importante de la existencia de un gradiente de presión es lo que se conoce como separación de la capa límite. La disminución de la presión en la dirección del flujo se denomina gradiente de presión favorable. El aumento de presión en la dirección del flujo se denomina gradiente de presión adverso ya que tiende a frenar el flujo. Por otro lado, los esfuerzos de corte existentes dentro de la capa límite tienden a frenar el flujo. Las partículas tienden a fluir a regiones del flujo donde el gradiente de presión sea menos adverso, generando de esta manera la separación de la capa límite.

Detrás de la zona de separación se produce una reestructuración del flujo que comúnmente se conoce como estela. Como efecto de la separación se produce un aumento notable en el arrastre y una baja en la sustentación.

El efecto de la separación de disminuir la cantidad neta de trabajo que puede ser efectuado por un elemento de fluido sobre el fluido circundante, a costa de su energía cinética, con el resultado neto de que la recuperación de presión sea

incompleta y que las pérdidas en el fluido (arrastre) se incrementen, se denomina efecto estela. La figura 1.27 representa un ejemplo de este fenómeno.

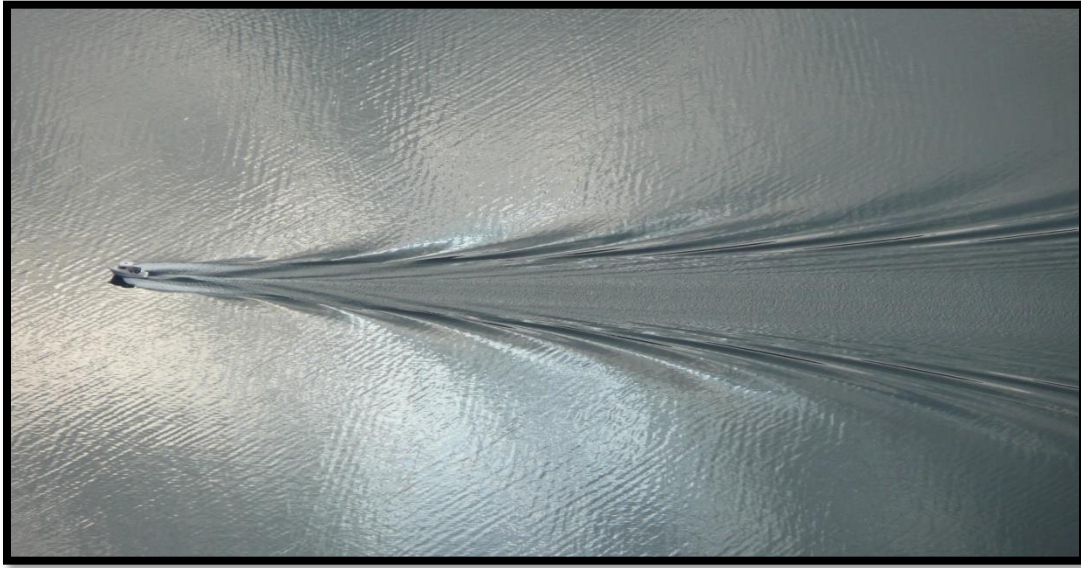


Figura 1.27: Ejemplo de formación de estela

El arrastre y la sustentación tienen dos componentes: el arrastre de forma y el de fricción superficial o arrastre viscoso. La separación y la estela que acompañan este fenómeno tienen una influencia profunda en el arrastre de forma sobre los cuerpos. Si se pudiera evitar la separación del flujo sobre un cuerpo, la capa límite permanecería delgada y la reducción de presión en la estela se evitaría, minimizando de esta forma el arrastre de presión. Redondear la cara frontal de los cuerpos para reducir la oportunidad de separación del flujo en los bordes agudos es efectivo. Más importante aún es dar forma aerodinámica a la porción de cola del cuerpo para asegurar que el punto de separación ocurrirá aguas abajo a lo largo del cuerpo, tanto como sea posible [23].

Ecuaciones de capa límite:

Continuidad

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

Momento en x

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{dP_e}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (13)$$

Momento en y

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

Energía

$$\rho u \frac{\partial h}{\partial x} + \rho v \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial u}{\partial y} \right) + u \frac{dP_e}{dx} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \quad (15)$$

Presión

$$P = \rho RT \quad (16)$$

Entalpía

$$h = c_p T \quad (17)$$

Con condiciones de borde de:

- En la pared: $y = 0, u = 0, v = 0, T = T_w$
- Al final de la capa límite: $y \rightarrow \infty, u \rightarrow u_e, T \rightarrow T_e$

2. Hipótesis

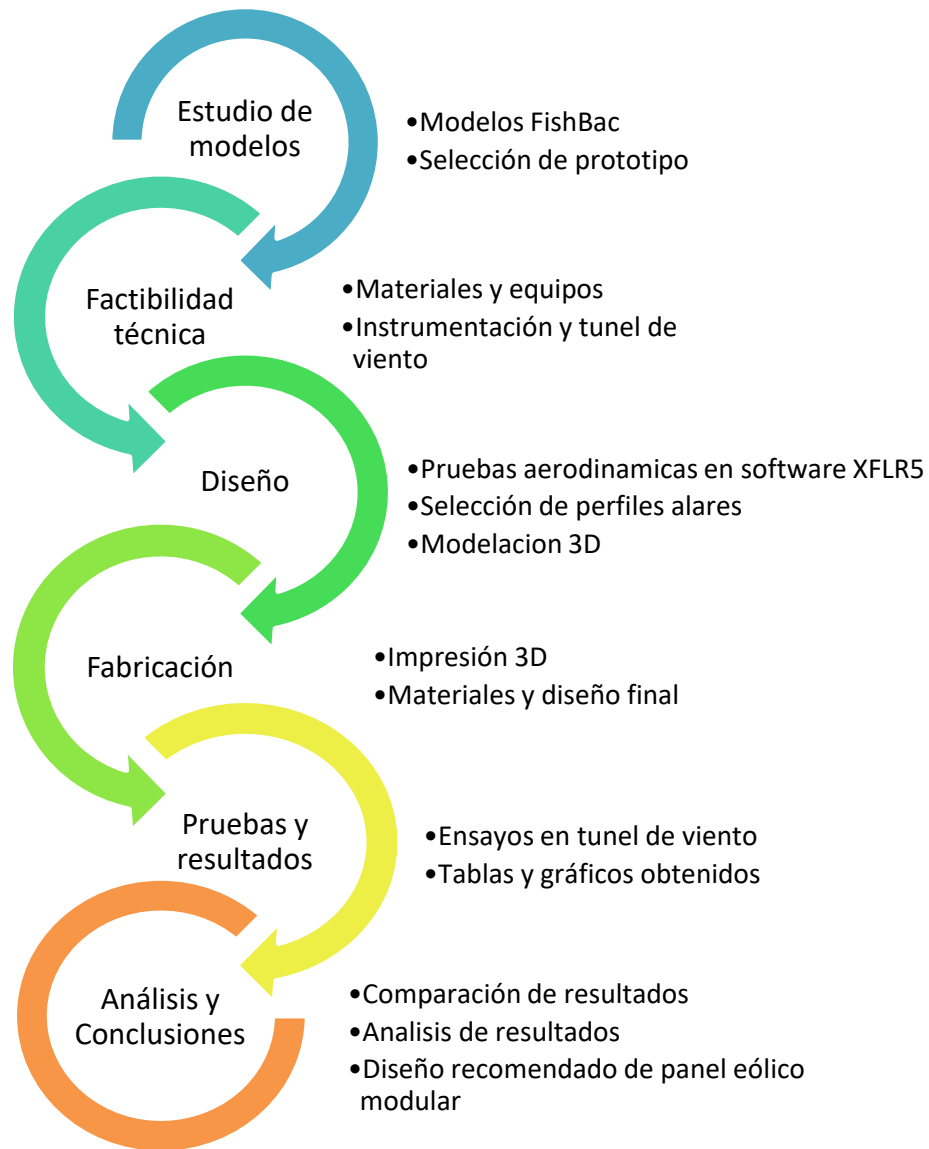
En función del trabajo de investigación previamente desarrollado nace la pregunta:

¿Puede un sistema modular eólico basado en caracteres biomiméticos aprovechar de manera más eficiente la energía del viento, en comparación a los actuales sistemas de generación de energía eólica?

Conforme al trabajo de investigación, se deduce que implementando mejoras en los perfiles alares se podría incrementar la eficiencia con cual se extrae la energía del viento. Se pretende desarrollar un perfil alar que imite caracteres que se encuentran en la naturaleza, los cuales se han estudiado previamente y se ha registrado una reducción en el arrastre aerodinámico gracias a ciertas morfologías en animales insertos en un fluido; como la ballena jorobada, el albatros y los peces en general (FishBAC).

3. Modalidad de trabajo

La modalidad de trabajo realizada en el presente trabajo de título (esquema 1), comprende el estudio teórico y el trabajo práctico de las materias influyentes en las áreas respectivas. Se realiza un estudio del modelo “FishBAC” del autor Benjamin Woods, evaluado previamente en los antecedentes. Luego, se presenta el estudio de factibilidad técnica, donde se evalúan los materiales y equipos requeridos para el diseño, entre ellos, la impresión 3D, el servomotor, etc. también, se contrastan tipos de perfiles y se escogen uno para seguir realizando pruebas, las siguientes pruebas sirven como base para la selección del perfil final, el cual, se diseña en Autodesk Inventor profesional 2016, y para contar con validez de los resultados, se realizan pruebas aerodinámicas en el software XFLR5.



Esquema 1: Esquema de trabajo

4. Estudio de modelos

El concepto FishBAC [19] es el principal modelo que se estudia en este trabajo para la configuración interna del perfil, vale la pena su estudio detallado debido a la cantidad de material respectivo, anteriores resultados obtenidos sobre modelación y pruebas en túneles de viento. El concepto teórico (Fig. 4.1) está formado por una sección rígida y una sección flexible. La sección rígida se compone por la parte delantera (borde de ataque) y trasera del perfil alar (borde

de fuga). La sección flexible se compone por la columna de flexión, el polímero flexible (piel que recubre esta zona central), la polea no reversible y los tendones.

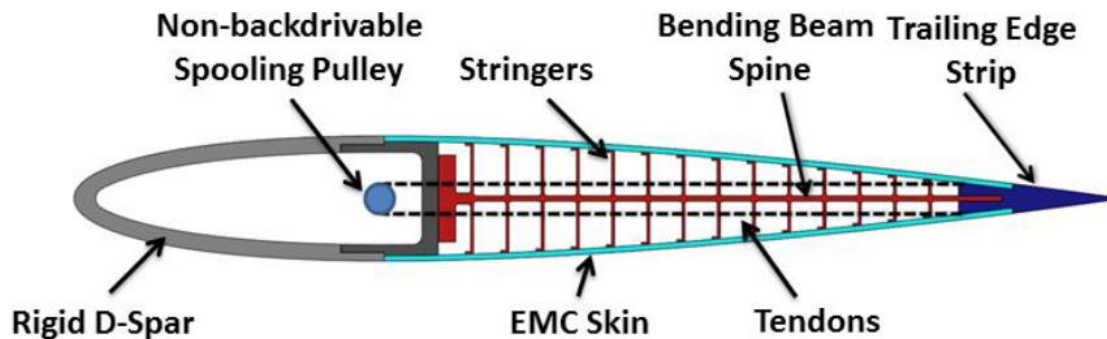


Figura 4.1: Concepto “FishBAC”

La ventaja de esta configuración permite la adaptación de la curvatura del perfil a las diferencias de presiones que se dan en la capa límite, el sistema de polea permite una flexión que se controla según la velocidad y oscilaciones del fluido. Otra ventaja es la independencia de equipos electrónicos. La desventaja se observa en el nulo control sobre el movimiento del perfil, esto, dificulta la medición puntual de las fuerzas de arrastre y sustentación.

El modelo (Fig. 4.2) con el cual experimenta Benjamin Woods [19] reemplaza la polea y los tendones por un mecanismo de flexión simplificado que corresponde a un servomotor que dirige el movimiento de la sección flexible del perfil. El servo permite un movimiento controlado del ángulo y el tiempo en flexión del perfil, con esta ventaja se pueden dar órdenes de manera programada. Este tipo de movimiento facilita la toma de datos de manera remota y permite un análisis controlado del arrastre y sustentación del perfil en cada ángulo de inclinación y flexión. Los parámetros de diseño de este modelo se presentan a continuación.

Parameter	Value
airfoil	NACA 0012 (baseline)
chord (c)	305 mm
span (b)	150 mm
start of morph (x_s)	$0.35c = 107$ mm
end of morph (x_e)	$0.85c = 260$ mm
spine thickness (t_b)	2 mm
# of stringer pairs	14
stringer thickness (t_{st})	0.8 mm
skin thickness (t_s)	1.5 mm
tendon offset (y_t)	4.2 mm
tendon diameter (d_t)	0.7 mm
pulley deflection angle ($\hat{o}_p$)	0 - 90°

Tabla 4.1: Variables geométricas del prototipo Fish

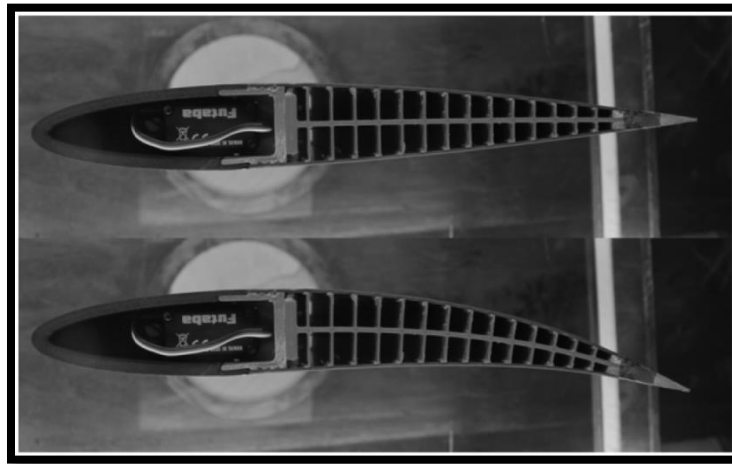


Figura 4.2: Modelo FishBac simplificado

En el informe desarrollado por B. Woods se comparan las pruebas aerodinámicas con un perfil rígido, con alerón en la parte trasera del perfil, esta, asemejando el ala de un avión. El informe abarca el comportamiento de los coeficientes de sustentación, arrastre, y eficiencia aerodinámica en función del grado de flexión de ambos modelos. Del trabajo se concluye que no existen diferencias significantes en términos de la sustentación entre ambos perfiles, que, el perfil rígido con alerón genera un aumento considerable del coeficiente de arrastre cuando está flexión máxima, un 285% más que el perfil en deflexión cero. También, que el modelo FishBAC presenta un aumento de un 59% en el coeficiente de arrastre en condiciones de máxima versus en deflexión cero. Y por último, que la eficiencia

aerodinámica del modelo FishBAC es menos sensible al ángulo de ataque, mostrando una alta eficiencia durante un mayor rango de ángulos en oposición al pico generado por el perfil rígido.

En la literatura existe otra configuración del modelo FishBAC, también con participación de B. Woods, el trabajo “The design of a coated composite corrugate skin for the camber porphing airfoil” presenta el diseño de un perfil con un recubrimiento elastómero compuesto por piel corrugada. Vale la pena citar que, *“La buena capacidad de deformación en el plano, la alta capacidad anisotrópica y el comportamiento de los paneles corrugados los hacen muy efectivos en aplicaciones de morfología alar”*. El estudio se centra con precisión en el estudio de la tensión en la zona central del perfil.

El desarrollo del informe parte con la pregunta, ¿cuál forma ondulada tiene más rigidez fuera del plano y menos rigidez en el plano?, *“Estos parámetros son importantes porque una mayor rigidez fuera del plano de la piel produce una deformación de menor flexión en condiciones aerodinámicas de carga. Además, esto aumenta el pandeo cuando la piel se somete a compresión”* [23]. Se estudiaron tres configuraciones (Fig. 4.3) en el software de modelación ABAQUS, se analiza la tensión versus el desplazamiento y se concluye que las secciones trapezoidales minimizan la tensión.

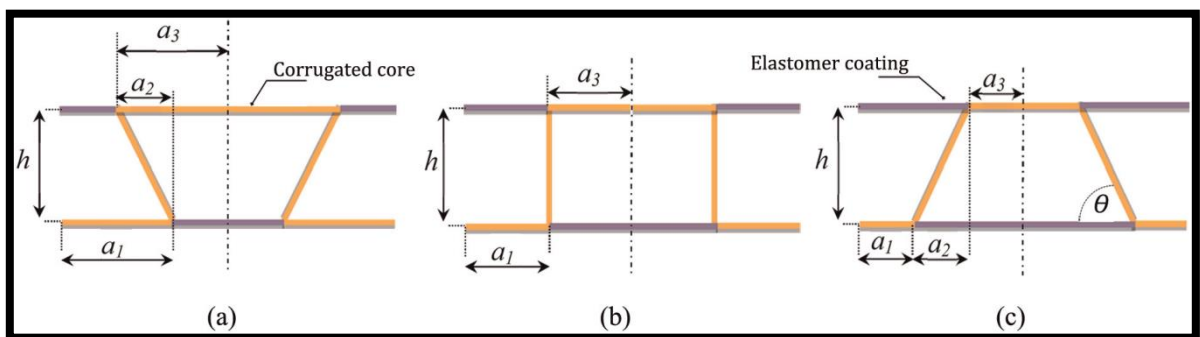


Figura 4.3: Configuraciones de celdas internas

El modelo se diseñó sobre el perfil NACA 0012. Este modelo presenta otra alternativa sobre el diseño que se pretende abarcar en este trabajo. Este modelo se escapa de las capacidades de diseño, construcción e investigación teórica del

objetivo de este trabajo de título, por esta razón, se presenta como alternativa para estudios posteriores.

5. Factibilidad técnica

5.1 Materiales

Para el modelo final se requiere construir partes del perfil biomimético en una impresora 3D, dada la necesidad de un prototipo a la medida que contenga las características de diseño que se desean plasmar.

La impresión del plástico utiliza impresoras 3D para plástico y materiales pertenecientes a tres clasificaciones de plásticos diferentes: resinas, poliamidas y ABS, para diferentes procesos que van desde la creación de prototipos rápidos de plástico hasta la impresión 3D del producto terminado. Los plásticos comúnmente utilizados en prototipado en impresión 3D, son el ABS y el PLA.

- Impresión 3D de ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un termoplástico, de superficie rugosa y con similitudes con el plástico en términos de textura, durabilidad y funcionalidad, se funde a aproximadamente 200°C. Es resistente y está disponible en varios colores. Se utiliza para crear objetos de uso diario, tales como juguetes.

- Impresión 3D de PLA

El ácido poliláctico (PLA) es un termoplástico de origen natural, cuya ventaja es la gran cantidad de colores disponibles y que permite impresiones más rápidas. Además, no emite gases perjudiciales al salir del extrusor (a diferencia del ABS). Es una opción popular por el hecho de que es ecológico y biodegradable. Es menos resistente que el ABS y es sensible al agua.

La capa externa de la sección media del perfil biomimético, debe ser capaz de permitir la flexión, es decir, se requiere de un material que pueda adaptarse al contorno de la zona interna del perfil de manera adecuada y, además, volver a su

condición original cuando se requiera. Las recomendaciones de los estudios previos señalan que el material ideal para cubrir esta zona es algún elastómero. El prototipo de B. Woods utiliza hojas de caucho de silicona como piel externa en la zona media.

La silicona de caucho se utiliza en la industria como empaquetadura y recubrimiento. La silicona de caucho posee buen desempeño en aplicaciones ligadas a resistencia al ozono, resistencia al calor, aislamiento eléctrico, resistencia al aceite, resistencia a los disolventes, resistente a la corrosión. Posee una resistencia a la tracción de 12MPa, un alargamiento de 300 a 350% y una densidad de 1.20 g/cm³.

5.2 Equipos

Para generar la curvatura en la zona media y trasera del perfil se requiere de un equipo electromecánico que tenga la capacidad para generar flexión. Este equipo debe poder ser controlado de manera remota y con la precisión para ajustar la flexión según la solicitud del caso. Además, no debe interferir con las pruebas aerodinámicas, por lo tanto, este equipo debe estar dentro del perfil. Para esta solicitud se prefiere utilizar un servomotor seleccionado por tamaño y potencia.

El servomotor a utilizar es un micro servo modelo Tower Pro SG90, el modelo y sus características se presentan a continuación.



Figura 5.2.1: Micro Servo Tower Pro SG90

- Dimensiones (L x W x H) = 22.0 x 11.5 x 27 mm

- Peso: 9 gramos
- Peso con cable y conector: 10.6 gramos
- Torque a 4.8 volts: 16.7 oz/in o 1.2 kg/cm
- Voltaje de operación: 4.0 a 7.2 volts
- Velocidad de giro a 4.8 volts: 0.12 seg/60 °
- Conector universal para la mayoría de los receptores de radio control. Compatible con tarjetas como Arduino y microcontroladores que funcionan a 5 volts.

Para el control del Micro Servo se requiere un controlador electrónico. Este controlador será una tarjeta Arduino. Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar.

6. Variables aerodinámicas e instrumentación

Las variables que influyen de manera directa en el estudio del perfil aerodinámico son presión, velocidad y fuerzas de arrastre y sustentación. Estas, se pueden medir en el túnel de viento con los equipos de medición adecuados. Se presenta a continuación la justificación de cada variable y sus respectivos equipos de medición.

Presión

Cuando se incrementa la velocidad en un punto del flujo, se produce un aumento en la presión dinámica, lo que trae consigo una disminución de la presión estática. Por esta razón, en un perfil alar se reduce la presión estática sobre la superficie superior por incremento de la velocidad. Lo importante en la sustentación es la forma de la distribución de presión relativa a lo largo del perfil (Fig. 6.1).

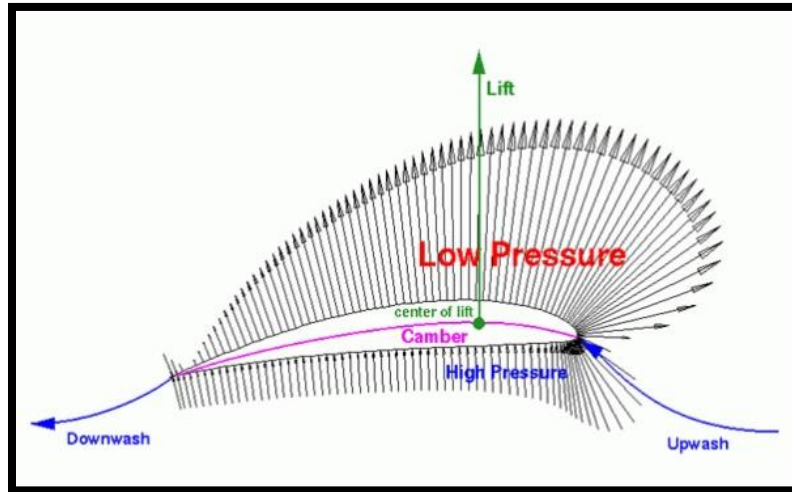


Figura 6.1: Perfil de presiones en un perfil alar

En la medición de presión se distinguen 3 categorías básicas, estándar, galgas mecánicas, y transductores electromecánicos. Los instrumentos estándar son usados para las calibraciones más precisas. Los manómetros de columna líquida son los más precisos y comunes. Los instrumentos de galgas mecánicas son más económicos y los dispositivos más usados para medir presión.

Velocidad

Parte del aire fluye por sobre el perfil y otra parte por debajo. Las líneas de corriente deben juntarse en el borde de fuga, por lo tanto, el aire que pasa por sobre la superficie superior tiene mayor velocidad puesto que recorre una mayor distancia que el aire que pasa por la curvatura inferior (para perfiles planos convexos y cóncavos).

La medición de velocidad se realiza mediante anemómetros. Existen diferentes tipos de anemómetros como el de deflexión de plaquetas, el de propulsor o paleta rotatoria, el de cucharas, el térmico y el láser (Doppler), entre otros. También se emplea el tubo Pitot. El tubo Pitot estático es el más común y sirve para medir la presión total y la presión estática, las cuales se relacionan con la velocidad.

Fuerza de Arrastre y Fuerza de Sustentación

La fuerza que se opone al movimiento de un objeto inserto en un fluido se denomina fuerza de arrastre o resistencia (Drag). En perfiles alares esta fuerza está relacionada con el ángulo de ataque y generalmente, crece de manera exponencial a medida que aumenta el ángulo de ataque.

La fuerza de sustentación (Lift) empuja en dirección vertical al cuerpo que enfrenta, encuentra su máximo valor a medida que aumenta el ángulo de ataque y justo antes de que ocurra el efecto de desprendimiento de la capa límite (Stall), esto depende de características de cada perfil y el punto exacto se llama ángulo de ataque crítico.

La balanza aerodinámica es el instrumento que se utiliza para medir de fuerzas y momentos que actúan sobre un modelo en un túnel de viento. La fuerza aerodinámica total y momentos son separados en sus componentes con la ayuda de varios sistemas mecánicos. El modelo es instalado en la cámara de pruebas del túnel con la ayuda de soportes como pueden ser vigas o alambres, que lo vinculan a la balanza.

7. Túnel de viento

Un túnel de viento es un sistema que genera una corriente de aire, limitado por un conducto de sección específica y/o variable a lo largo del mismo, para lograr condiciones especiales en el flujo y simular el movimiento de objetos con el fin de analizar fenómenos aerodinámicos, como fuerzas y líneas de corriente, entre otros. El túnel de viento está ubicado en el laboratorio de Termofluidos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María (Fig. 7.1). Las características generales del túnel se presentan en la siguiente tabla.

General	
Marca	Aerolab
Tipo	Abierto Subsónico
Cámara de ensayos	

Forma	Rectangular
Velocidad mínima	0.5 m/s
Velocidad máxima	80 m/s
Medición	
Velocidad	Rango 0 - 80 m/s Resolución 1 m/s
Fuerza de sustentación	Rango 0.1 - 1.7 kgf Resolución 0.02 kgf
Fuerza de arrastre	Rango 0.1 - 1.2 kgf Resolución 0.01 kgf

Tabla 7.1: Características túnel de viento

En la sección de pruebas (Fig. 7.2) es donde se instala el modelo u objeto, y se determina visualmente los cambios en el flujo, y físicamente las fuerzas aerodinámicas. Por tal motivo debe ser transparente, para visualizar el flujo y debe ser dimensionado para evitar el desprendimiento de capa límite.

El túnel de viento posee una balanza mecánica que permite medir las fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre, estas fuerzas, son transmitidas por medio de ejes, poleas y cables tensores, hasta llegar a un panel de medición (Fig. 7.3) que muestra la cantidad de fuerza aplicada. Para medir la velocidad en el túnel se emplea un tubo Pitot. El tubo Pitot estático es el más común y sirve para medir la presión total y la presión estática, las cuales, se relacionan con la velocidad del flujo y se mide en el tablero de la figura 7.4.



Fig. 7.1: Túnel de viento

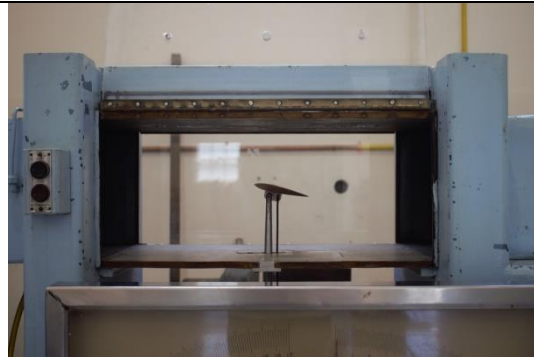


Fig. 7.2: Perfil alar en cámara de pruebas



Fig. 7.3: Tablero superior, fuerzas Lift y Drag



Fig. 7.4: Tablero inferior, Velocidad en m/s

Para efectos de tomar medidas que correspondan con las fuerzas reales que se aplican en el túnel, se decide estudiar el mecanismo de ejes, poleas, cuerdas y manecillas que controlan la calibración y ajuste a cero del túnel (Fig. 7.5), también, se hizo con el fin de corregir posibles desviaciones y reducir el error.

La diferencia de presiones entre la cara inferior y superior del perfil, ejercen una fuerza que arrastra al eje del soporte del elemento hacia arriba (fuerza de sustentación). Esta fuerza es transmitida desde la placa en horizontal que soporta el eje hasta 2 poleas (Fig. 7.6) que transmiten el movimiento al eje que mueve la manecilla de “Lift” en el tablero. El ajuste en cero del Lift en el tablero se realiza girando la manecilla (Fig. 7.7) ubicada en la parte superior del mecanismo y bajo la cámara de pruebas.

Para un sólido que posee un movimiento relativo en un fluido, el arrastre es la suma de todas las fuerzas aerodinámicas en la dirección del flujo del fluido externo. Esta fuerza es captada por un desplazamiento lateral del eje del soporte

del elemento, luego, es transmitida por la placa metálica en vertical (Fig. 7.8), hasta dos poleas que giran el eje que mueve la manecilla de “Drag” en el tablero. El ajuste en cero del Drag en el tablero se realiza girando la manecilla (Fig. 7.9) ubicada en la parte inferior del mecanismo y bajo la cámara de pruebas.

El ajuste preciso del mecanismo de calibración se realiza girando y desplazando la posición de las tuercas (Fig. 7.10). Estas, se encuentran ubicadas cerca de la posición de las perillas que miden la sustentación y el arrastre. Luego de múltiples pruebas, se observa que es necesario volver a ajustar a cero el mecanismo por cada cambio de pieza y entre pruebas consecutivas por el leve desajuste que sufre el sistema. Se comprueba en el estudio del mecanismo, que los factores que desvían el cero en los tableros son, el movimiento en general del sistema completo, el recambio de piezas de medición, la rápida puesta en marcha del túnel (alta velocidad desde el inicio), el movimiento de eje que soporta la pieza, y el uso prolongado.



Fig. 7.5: Mecanismo de transmisión de fuerzas

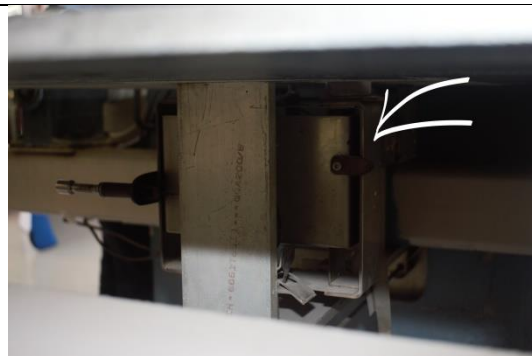


Fig. 7.6: Mecanismo de transmisión de fuerza Lift

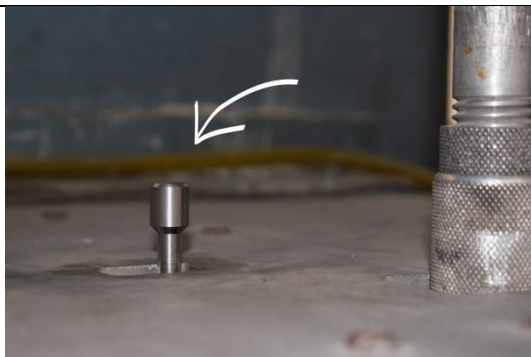


Fig. 7.7: Perilla ajuste Lift

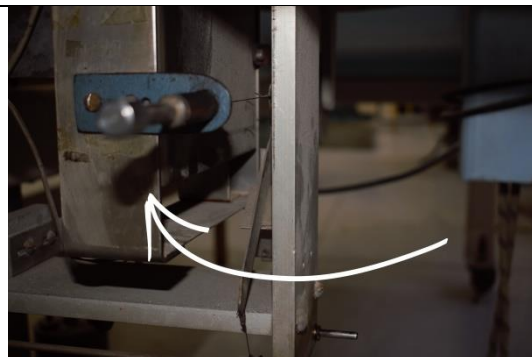


Fig. 7.8: Mecanismo de transmisión de fuerza Drag



Fig. 7.9: Perilla ajuste Drag



Fig. 7.10: Tuercas de ajuste preciso

Ajuste a cero y calibración

Fuerza de arrastre

El primer paso para ajustar la fuerza de arrastre a cero, fue ajustar la perilla del mecanismo de esta fuerza. Para comprobar que existe relación entre el valor real y el medido, se recurrió a comparar los valores de las fuerzas con respecto a la literatura. La relación entre el número de Reynolds y el Coeficiente de Arrastre (ambos números adimensionales) ha sido estudiada extensamente en el caso de la esfera, y existen varias correlaciones que se ajustan bastante bien a los datos experimentales.

La correlación obtenida del grafico 7.1 [26] de estos números adimensionales en esferas, muestra que el valor del coeficiente de arrastre (C_d) se mantiene constante entre $10^4 \leq Re \leq 10^5$. Lo cual, nos permite asumir $C_d = 0.4$ para este régimen de Re .

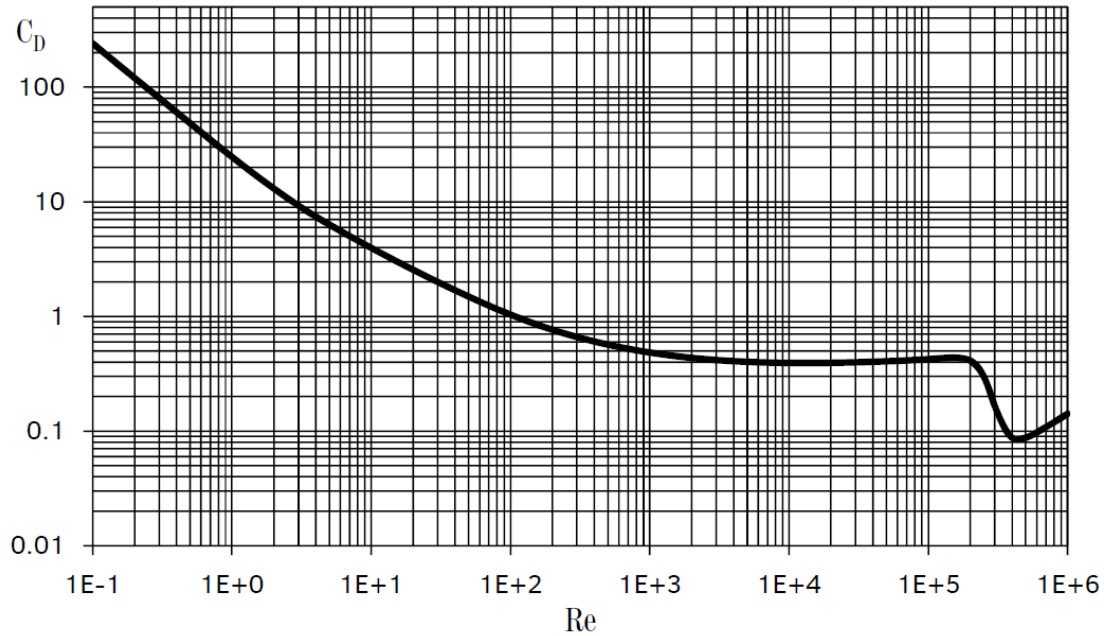


Gráfico 7.1: Relación entre Cd y Re para esferas

La relación entre el número adimensional Cd y la fuerza de arrastre (fórmula 4) nos permite comparar con las relaciones de la literatura y con los valores medidos en el túnel.

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (4)$$

Siendo,

- C_d : coeficiente de arrastre
- F_d : Fuerza de arrastre o Drag
- ρ : Densidad del aire
- v : Velocidad del flujo de aire
- A : Área de referencia

Los valores constantes utilizados en los ensayos fueron $Cd = 0.4$, $\rho = 1.2 \frac{kg}{m^3}$ y $A =$

$$\frac{\pi D^2}{4}$$

En el laboratorio de termofluidos de la universidad se cuenta con un set de esferas diseñadas para este tipo de ensayo (fig. 14), por lo tanto, se procede a realizar ensayos según los regímenes adecuados.

Prueba de calibración 1

Esta prueba relaciona el ajuste de las tuercas con respecto al valor del arrastre medido en el tablero del túnel. Se mantuvo constante el diámetro de la esfera (0.1m) y se probó con 3 posiciones de la tuerca que controla la inercia del eje del Drag, muy cerca del eje, en la zona media y en el extremo. El Drag se mide en “kgf” y cada tras medición completa se volvió a ajustar a cero el tablero. Los resultados se presentan en la tabla 7.2.

			Tuerca en interior		Tuerca en centro		Tuerca en extremo	
Reinolds	V (m/s)	Drag Calculado (kgf)	Drag medido (kgf)	Error 1	Drag medido (kgf)	Error 2	Drag medido (kgf)	Error 3
3,33E+04	5	0,01	0,01	0%	0,01	0%	0,01	0%
4,00E+04	6	0,01	0,01	0%	0,01	0%	0,01	0%
4,67E+04	7	0,01	0,01	0%	0,01	0%	0,02	-100%
5,33E+04	8	0,01	0,01	0%	0,01	0%	0,02	-100%
6,00E+04	9	0,02	0,02	0%	0,02	0%	0,03	-50%
6,67E+04	10	0,02	0,02	0%	0,02	0%	0,03	-50%
7,33E+04	11	0,02	0,03	-50%	0,02	0%	0,04	-100%
8,00E+04	12	0,03	0,03	0%	0,03	0%	0,05	-67%
8,67E+04	13	0,03	0,04	-33%	0,04	-33%	0,05	-67%
9,33E+04	14	0,04	0,05	-25%	0,05	-25%	0,06	-50%
1,00E+05	15	0,04	0,06	-50%	0,06	-50%	0,07	-75%

Tabla 7.2: Resultados de ensayo variando la posición de la tuerca de ajuste fino

Este ensayo nos permite saber cómo ajustar la posición de la tuerca para disminuir el error. Se observa del ensayo, que la posición “Tuerca cerca del eje” (Fig. 7.13) y “Tuerca en centro” (Fig. 7.12) fueron las posiciones que tuvieron el menor error, mientras que “Tuerca en extremo” (Fig. 7.11) presenta errores en casi todas las mediciones individuales. También, vale la pena recalcar que el error aumenta (en solo una unidad de medición) a medida que el número de Reynolds

se acerca a $1,00E+05$ y esto, posiblemente porque se ve un leve aumento en el C_d a medida que este valor crece en el gráfico 7.1.



Fig. 7.11: Tuerca de ajuste preciso situada en extremo

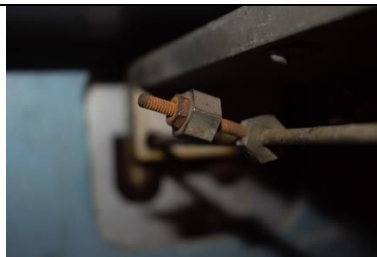


Fig. 7.12: Tuerca de ajuste preciso situada en centro



Fig. 7.13: Tuerca de ajuste preciso situada cerca del eje

Prueba de calibración 2

El siguiente ensayo se realiza midiendo la velocidad del viento de dos formas diferentes y comparando los resultados del arrastre según estas velocidades con el valor aproximado asumiendo $C_d = 0.4$.

Una forma de medir la velocidad es mediante el tablero que viene incorporado en el túnel de viento (Pitot) y la segunda es mediante un anemómetro digital ubicado en frente de la esfera (Fig. 7.15). El mecanismo del tubo Pitot del túnel incluye 4 tomas de presión en las caras rectangulares del túnel, justo previo a la cámara de pruebas, mientras que el anemómetro digital, mide un punto único previo a la esfera.

Las fuerzas de arrastre para las velocidades tomada con el anemómetro digital (Drag AD) y para el tubo Pitot (Drag Pitot) fueron calculadas según (1). Para tomar la medida de arrastre en el tablero, el anemómetro es retirado con tal que no afecte la medición. A continuación, se presenta la tabla de resultados.

Re AD	Re Pitot	Velocidad AD (m/s)	Velocidad Pitot (m/s)	Drag desde tablero	Drag AD	Drag Pitot	Error AD	Error Pitot
2,67E+04	1,73E+04	4	4	0,01	0,01	0,01	0%	0%
4,00E+04	2,60E+04	6	6	0,02	0,01	0,01	50%	50%
6,67E+04	5,20E+04	10	12	0,03	0,02	0,03	33%	0%
9,33E+04	6,93E+04	14	16	0,05	0,04	0,05	20%	0%
1,20E+05	9,10E+04	18	21	0,08	0,06	0,09	25%	-13%

1,47E+05	9,53E+04	22	22	0,09	0,09	0,09	0%	0%
----------	----------	----	----	------	------	------	----	----

Tabla 7.3: Resultados de ensayo de Drag y medición de velocidades

Se observa que calcular el Drag según las velocidades medidas por el tubo Pitot (tablero) presenta menor error que medirlas con el anemómetro digital. Por lo tanto, procedemos a usar las velocidades que entrega el tablero del túnel como referencia.

Fuerza de sustentación

Para analizar la variación que existe entre la posición de la tuerca de ajuste fino y las mediciones de las fuerzas de Lift y Drag, se realiza un ensayo con un perfil alar NACA 0012 diseñado en madera (Fig. 7.16) a velocidades desde 5 m/s hasta 35 m/s.

Variación posición tuerca		Tuerca cerca del eje		Tuerca en centro		Tuerca en extremo	
		Lift	Drag	Lift	Drag	Lift	Drag
Reinolds	V (m/s)	M 1	M 1	M 2	M 2	M 3	M 3
3,33E+04	5	0	0	0	0	0	0
4,00E+04	6	0	0	0	0	0	0
4,67E+04	7	0	0,01	0	0	0	0
5,33E+04	8	0,02	0,01	0	0,01	0,02	0,01
6,00E+04	9	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
6,67E+04	10	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
7,33E+04	11	0,04	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01
8,00E+04	12	0,04	0,02	0,04	0,01	0,04	0,01
8,67E+04	13	0,06	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02
9,33E+04	14	0,08	0,02	0,06	0,02	0,08	0,02
1,00E+05	15	0,08	0,03	0,08	0,02	0,1	0,02
1,33E+05	20	0,14	0,05	0,14	0,05	0,16	0,05
1,67E+05	25	0,2	0,08	0,2	0,09	0,22	0,08
2,00E+05	30	0,28	0,12	0,26	0,12	0,3	0,12
2,33E+05	35	0,36	0,16	0,36	0,17	0,34	0,15

Tabla 7.3: Resultados de ensayo de Lift y Drag con respecto a posición de las tuercas

Se observa de la tabla 7.3, que la variación entre las fuerzas en los tres casos es menor o igual a un rango de medición (0,02 kgf) y de carácter aleatorio. Esta conclusión se justifica con el error asociado a la lectura del instrumento de medición, la cual, se realiza observando la posición relativa de la aguja que marca

la sustentación o el arrastre. La aguja varía entre los dos rangos consecutivos de medición lo cual, puede generar confusión en la lectura.

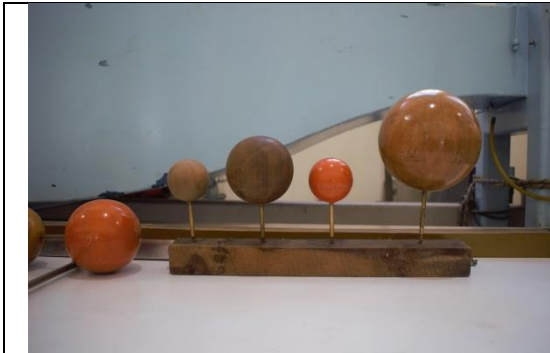


Fig. 7.14: Set de esferas para pruebas



Fig. 7.15: anemómetro midiendo antes de la esfera



Fig. 7.16: eje con variador de ángulo de ataque



Fig. 7.17: Soporte de perfil alar

8. Diseño

8.1. Modelación 2D en software XFLR 5

El primer estudio de modelación se basa en pruebas en el software XFLR5, software de libre uso, diseñado para pruebas en 2D de perfiles alares y en 3D para modelos de planeadores. Se trabaja con la herramienta “Batch Analysis” del módulo de simulación en 2D, de la cual es posible obtener los gráficos de C_d v/s α , C_l v/s α y C_l/C_d v/s α de los perfiles alares.

Las variables del diseño de las pruebas se incluyen en la siguiente tabla:

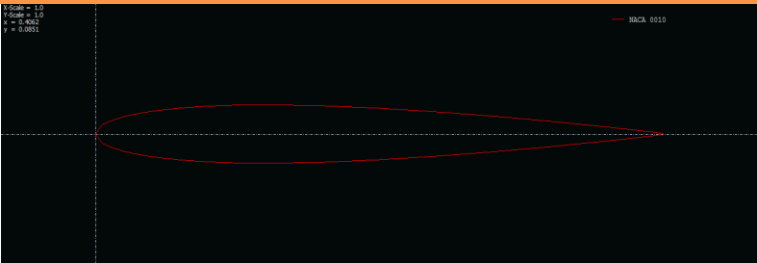
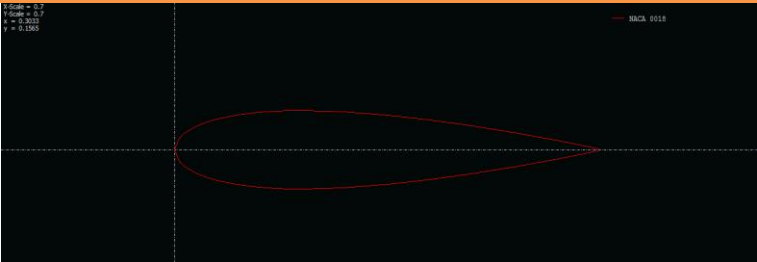
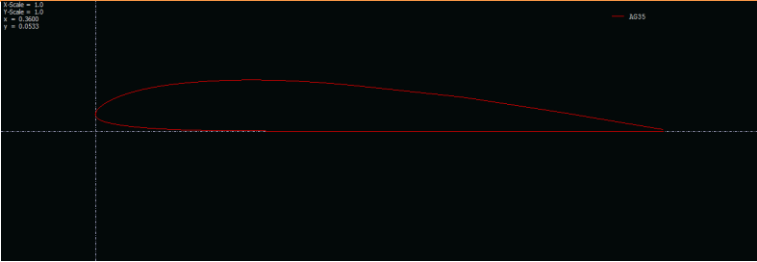
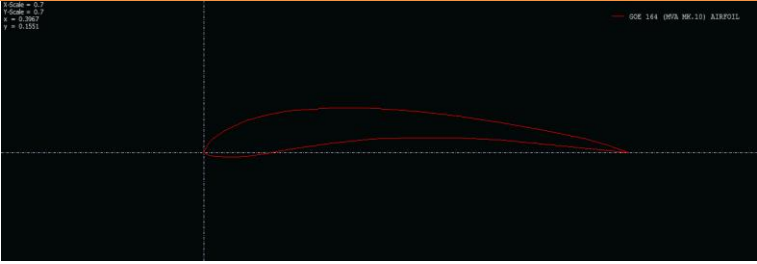
Especificación	Valor
Velocidad	3.7 – 22 m/s
Largo de la cuerda	200 mm
Angulo de ataque	0° – 15°
Incremento ángulo de ataque	1°
Numero de Reynolds	50.000 - 300.000
Incremento de Re	50.0000

Tabla 8.1.1: Variables y sus valores en pruebas aerodinámicas

Se define el rango de velocidades según el motivo de estudio que se persigue en este trabajo, principalmente, el diseño de un modelo que permita aprovechar de manera más eficiente la energía del viento, por lo tanto, es sensato tomar velocidades que estén en un rango de velocidades máximas comunes en la práctica.

La longitud de cuerda depende del tamaño de prototipo y de sus características de forma, se estima que es conveniente un modelo de un tamaño constructivo que pueda ser impreso en partes en una impresora 3D. Es importante estudiar el comportamiento de los perfiles antes del desprendimiento, que generalmente, ocurre entre 10 y 20° de inclinación de ángulo de ataque.

Se tomó como variable clave la curvatura, por lo tanto, se realizó el estudio para modelos de perfiles biconvexos simétricos, planos convexos y cóncavos, con el fin de estudiar el comportamiento según las variables antes mencionadas. Se seleccionaron dos modelos por cada tipo de perfil con el fin de estudiar detalles aerodinámicos y de construcción. De los perfiles Biconvexos simétricos se tomó el perfil NACA 0010 y el perfil NACA 0018, de los perfiles Plano convexo se seleccionó BAMBINO 6 y AG35, de los perfiles cóncavos se seleccionó GOE 164 y GOE 462.

Tipos	Nombre	Imagen
Biconvexo simétrico	NACA 0010	
	NACA 0018	
Plano convexo	BAMBINO 6	
	AG 35	
Cóncavo	GOE 164	

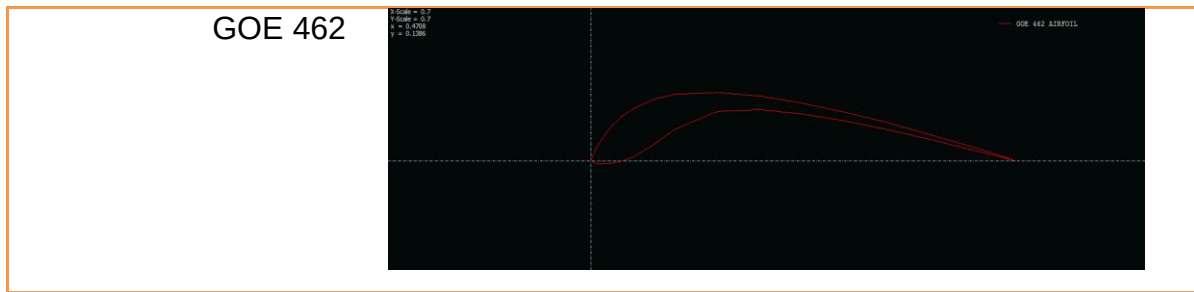


Tabla 8.1.2: Selección de perfiles alares

Análisis aerodinámico:

De los resultados obtenidos se puede observar características particulares para cada tipo de perfil, aunque, de modo general se pudo detectar un bajo coeficiente de arrastre en ángulo de ataque cero. Las diferencias se encuentran en el coeficiente de sustentación y en el ángulo de ataque en el cual se produce la pérdida de sustentación. A continuación, se presentan las diferencias y similitudes entre los tipos de perfiles.

- I. Biconvexo simétrico: La eficiencia aerodinámica es mayor entre más delgada es la cuerda del perfil, por lo tanto, el perfil NACA 0010 es más eficiente que el NACA 0018. La sustentación aumenta con pendiente recta en función del ángulo de ataque hasta los 10° en ambos perfiles. El desprendimiento de la capa límite ocurre con mayor retraso en el perfil NACA 0010 y es notorio a los 12° aproximadamente, mientras que en el perfil NACA 0018 ocurre cerca de los 8° .
- II. Plano convexo: Ambos perfiles presentan características completamente opuestas. La eficiencia aerodinámica es mayor para el perfil AG 35. La sustentación aumenta con pendiente recta en función del ángulo de ataque hasta los 10° para el perfil AG 35, mientras que el perfil Bambino 6 la sustentación se comporta de manera más errática y es aproximadamente un 25% menor a la de su compañero. El desprendimiento de la capa límite ocurre con mayor retraso en el perfil Bambino 6 pero el arrastre es mayor

en este perfil. Por la alta eficiencia del perfil AG 35 conviene estudiar más perfiles de este modelo para tener una decisión más informada

- III. Cóncavo: El perfil GOE 462 presenta resultados altamente variables y por su diseño se descarta de manera inmediata. Sin embargo, su compañero GOE 164 que presenta una cuerda más delgada posee cualidades aerodinámicas ideales, una alta eficiencia aerodinámica, alta sustentación y un desprendimiento de la capa límite cercano a los 8° .

Preselección de perfiles:

Gracias al estudio en perfiles alares realizado en el trabajo de título realizado por el alumno Israel Briceño, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. Se obtiene una elevada sustentación y disminuido arrastre, incluso, para elevados ángulos de ataque de los perfiles Eppler 387 y Seiling 1223. Esto hace que sean ideales para modificar su estructura y probar diferentes configuraciones. Se escoge el modelo Eppler 387 (Fig. 8.1.1), su estudio en el software XFOIL 5 se realiza con las mismas variables aerodinámicas de los estudios de perfiles realizadas anteriormente. El perfil (Fig. 8.1.1) y el ensayo aerodinámico (Graf. 8.1.1) se presentan a continuación.

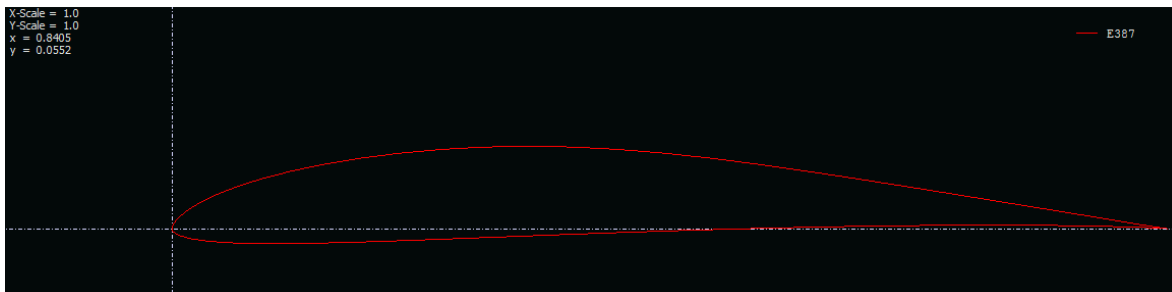


Figura 8.1.1: Perfil EPPLER 387

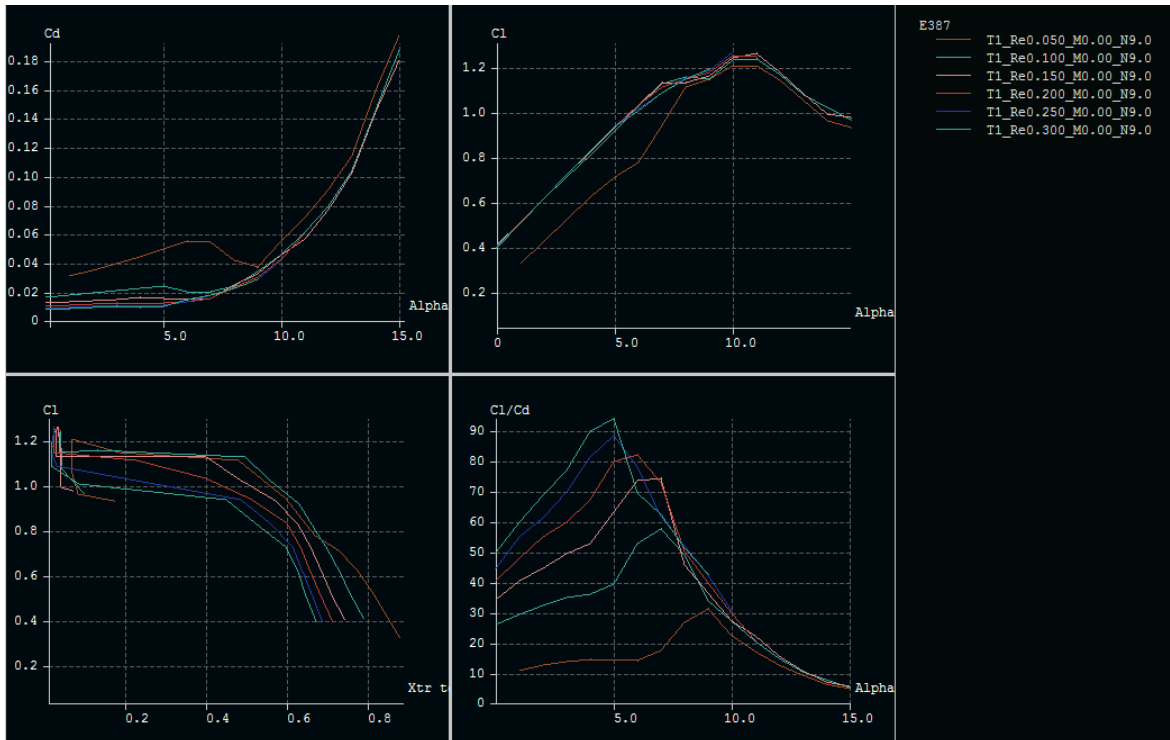


Gráfico 8.1.1: Estudio aerodinámico a diferentes números de Reynolds, Eppler 387.

- i. El primer gráfico (C_d v/s α) muestra que el coeficiente de arrastre aumenta de manera exponencial luego que el perfil alcanza 7° de inclinación con respecto a la normal, además, se mantiene creciendo de allí en adelante y se comporta de manera similar para el rango de velocidades escogido.
- ii. El segundo gráfico (C_l v/s α) muestra que el coeficiente de sustentación aumenta de manera creciente hasta alcanzar 10° de inclinación con respecto a la normal, luego, empieza a decaer de manera constante.
- iii. El tercer gráfico (C_l v/s $X_{tr} t$) representa el comportamiento del coeficiente de sustentación a lo largo del perfil alar, se observa un desempeño parejo hasta el 40% desde el borde de ataque. Luego, este desempeño cae rápidamente. La mayor distribución de la fuerza de sustentación es aplicada en este rango del perfil.
- iv. El cuarto gráfico (C_l/C_d v/s α) representa la eficiencia aerodinámica en función del ángulo de ataque, la eficiencia se observa en puntos específicos y decae rápidamente para los ángulos vecinos. Se observa que se comporta de manera similar, pero con desfase para las distintas

velocidades. A mayor velocidad y a menor ángulo de ataque aumenta la eficiencia aerodinámica.

8.2. Modelación 3D en software XFLR 5

Se diseña un ala en la herramienta “Wing and Plane Design”, con el fin de obtener un resultado aproximado del comportamiento aerodinámico en 3D del perfil alar Eppler 387. El ala y sus características de diseño se presentan a continuación:

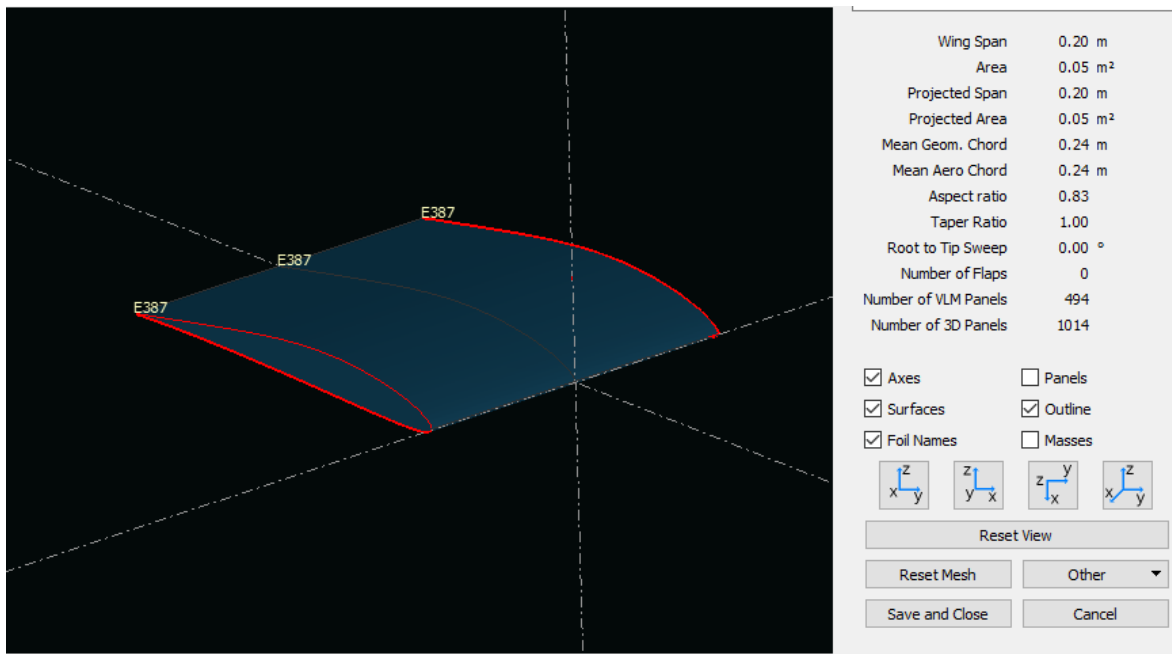


Fig. 8.2.1: Modelación 3D en software XFLR5 del perfil Eppler 387

Se realiza un análisis aerodinámico a velocidad constante de 20 m/s, se hizo bajo el método de VLM (Vortex Lattice Method). Con este método, el cálculo de la distribución de sustentación, los ángulos inducidos y la resistencia inducida se realiza de manera no viscosa y lineal. Dado que el cálculo es no viscoso y lineal, las variables viscosas como la resistencia de fricción o las transiciones, se calculan a partir de la interpolación de los valores de C_l obtenidos para las polares. Esto genera una limitación a la hora de calcular puntos que se encuentren cercanos a la entrada en pérdida [25].

La inercia se toma en función de la geometría del ala, la densidad y viscosidad cinemática del aire son 1.225 [kg/m³] y 1.5 *10⁻⁵ [m²/s] respectivamente. Se hace variar el ángulo de ataque cada 1°, desde 0 hasta 20°. Las líneas de color

verde (Fig.8.2.2) representan el perfil de distribución de la fuerza Lift y las de color magenta las líneas de corriente. A continuación, se presenta el modelo y sus resultados.

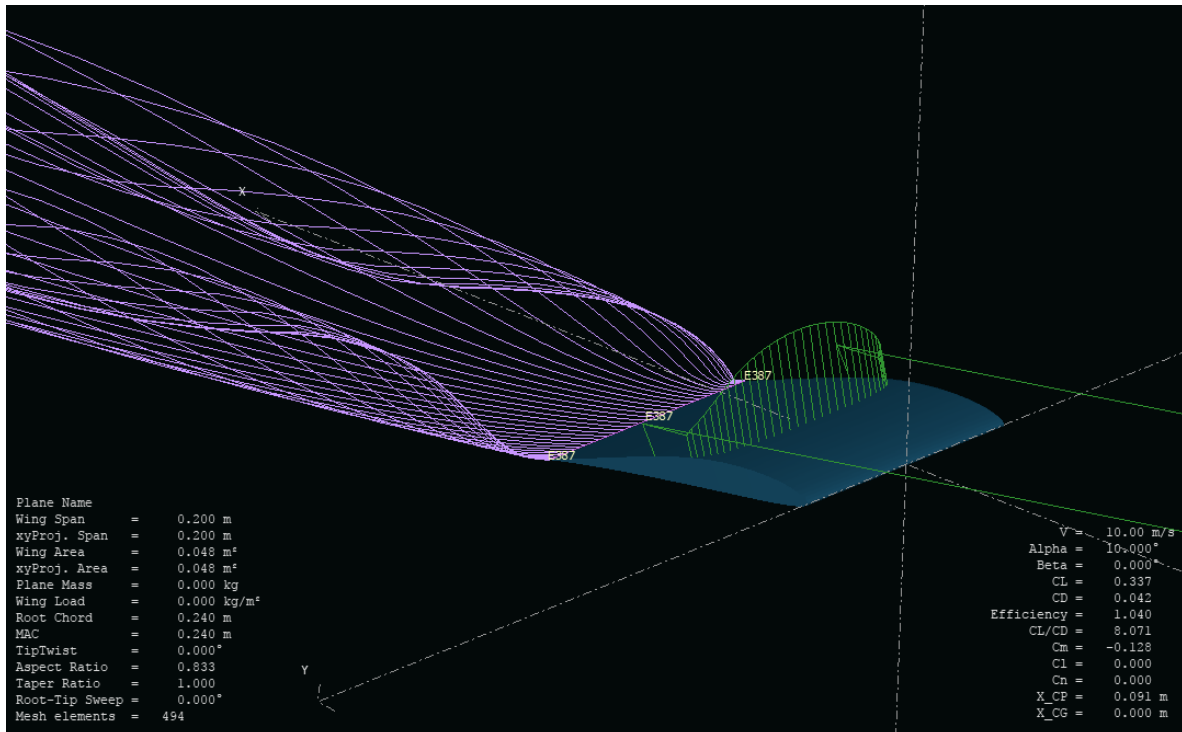


Fig. 8.2.2: Análisis 3D del perfil Eppler 387 en 10° de ángulo de ataque

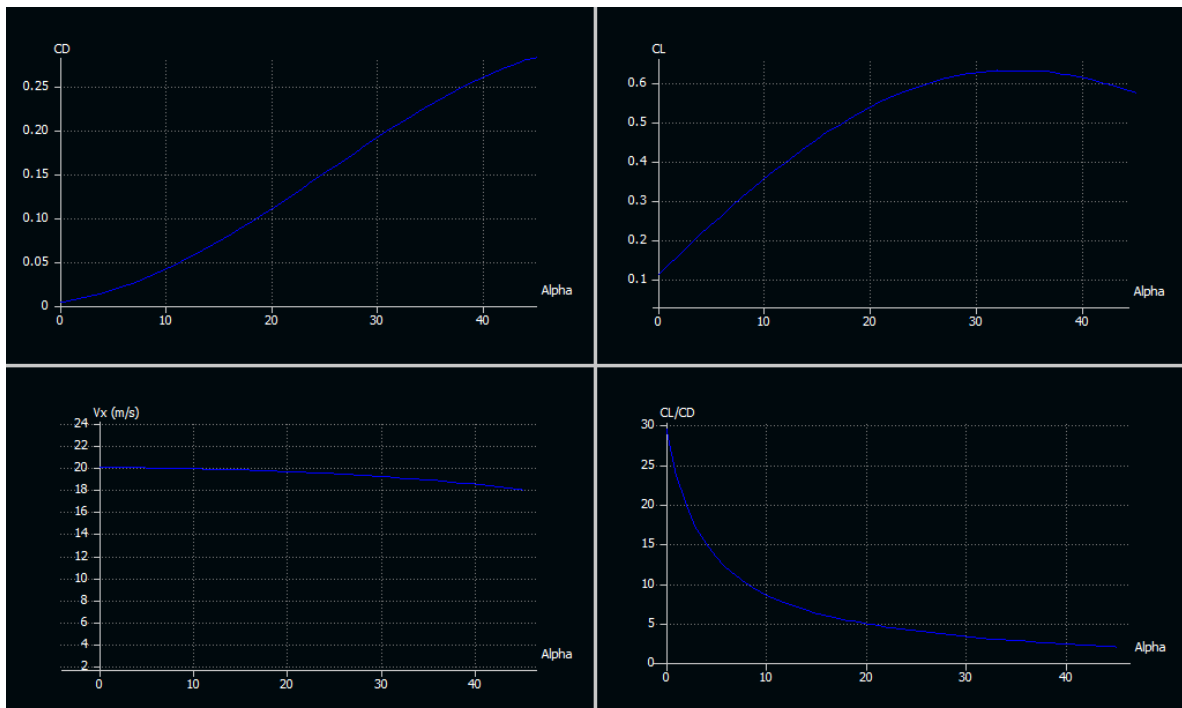


Gráfico 8.2.1: CL, Cd y Alpha de Eppler 387 de 0 a 45° de ángulo de ataque

De los gráficos se observa que el coeficiente de sustentación aumenta hasta un máximo, luego de eso, decae, y también, se observa que su comportamiento parece una parábola con mínimo en 35° . El coeficiente de arrastre aumenta de manera constante, similar al comportamiento lineal a medida que aumenta el ángulo. También, se puede rescatar que la eficiencia aerodinámica decrece de manera exponencial, donde su máximo valor es en 0° . Estos resultados sirven como primera iteración, y base de comparación con el modelo, y pruebas reales en el túnel de viento.

8.3. Modelación en software Inventor Professional

Este software ofrece un conjunto de herramientas fáciles de usar para diseño mecánico en 3D, documentación y simulación de productos.

Es necesario diseñar y validar el prototipo antes de su creación, por eso, se integran dos modificaciones en el borde de ataque del perfil EPPLER 387. Ambas modificaciones se inspiran en los tubérculos que presentan las ballenas jorobadas en sus aletas [2]. Las modificaciones difieren en el número de protuberancias que existen en la envergadura del perfil.

Los resultados del estudio de estas características [2] se estudiaron en los antecedentes de este trabajo. Se realizaron pruebas con un cuerpo similar a la aleta de una ballena, a escala, en un perfil NACA 0020. Estas pruebas cuentan con dos modelos y se comparan en los resultados hidrodinámicos, un modelo tiene protuberancias y el otro no. El modelo con protuberancias muestra un desplazamiento del ángulo de ataque al cual se produce el efecto de pérdida de sustentación (stall), mientras el perfil sin protuberancias pierde sustentación a 11° de inclinación con un máximo C_l de aproximadamente 0.8, el perfil con ellas pierde sustentación a 16° de inclinación con un máximo C_l de aproximadamente 0.95.

El primer modelo (Fig. 8.3.1) posee cinco tubérculos equidistantes cada 20 [mm], fueron diseñados con la herramienta solevación a través de dos rieles guías, un riel inferior que sigue el contorno del perfil y uno superior que sigue una línea

similar al contorno de las protuberancias de la ballena jorobada [2]. La vista está en perspectiva.

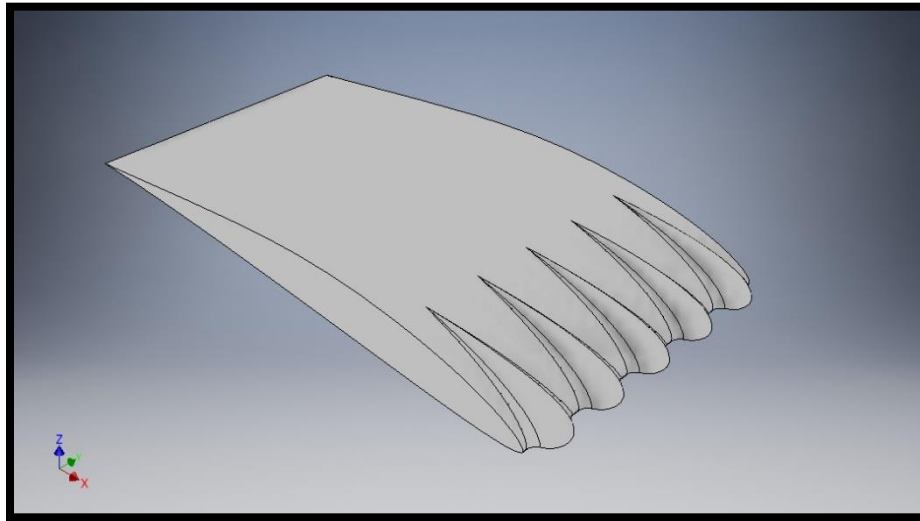


Fig.8.3.1: Perfil Eppler 387 con cinco protuberancias

El segundo modelo (Fig.8.3.2) posee tres tubérculos equidistantes cada 40 [mm], fueron diseñados de igual forma que el primer modelo. Este modelo presenta una variación en el número de tubérculos y la distancia a las que se encuentran, su fin es encontrar la configuración que maximice la sustentación.

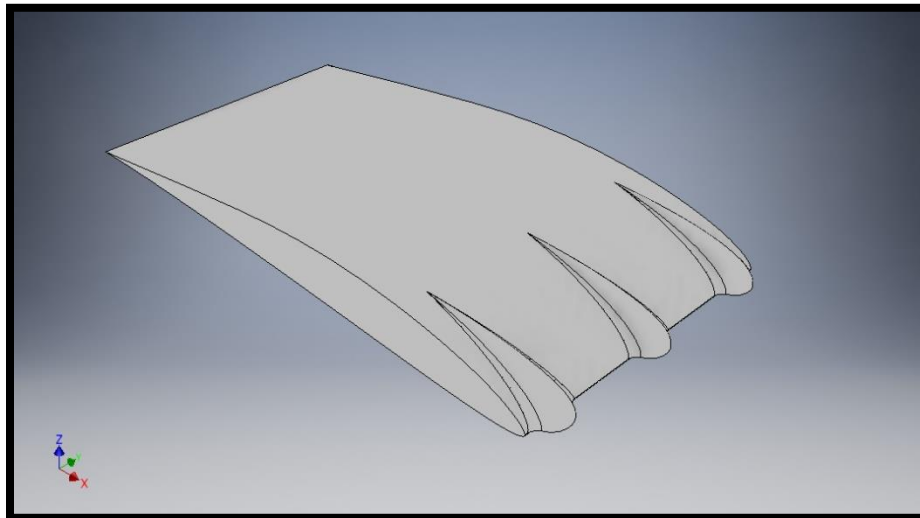


Fig.8.3.2: Perfil Eppler 387 con tres protuberancias

9. Prototipado

El prototipo del perfil alar se diseña en el software Autodesk Inventor 2016 y luego, es impreso en plástico ABS blanco en una impresora 3D gracias al servicio de Kraken, una empresa dedicada diseño y fabricación de prototipos de alta fidelidad. Se utilizó la resolución High (0.1 mm) y se divide el prototipo en dos partes con el fin de su impresión en el eje correcto. Las piezas fueron diseñadas para encajar entre ellas. El diseño (Fig. 9.1 a 9.6), el modelo impreso (Fig. 9.7 y 9.8) y la tabla de características (Tabla 9.1) se presentan a continuación.

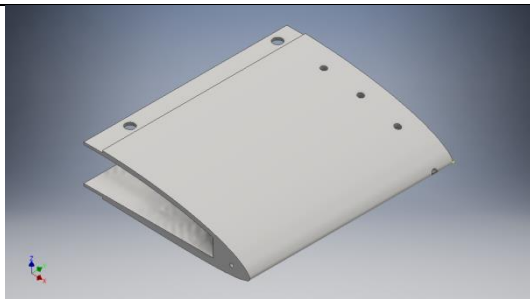


Fig. 9.1: Borde de ataque 1

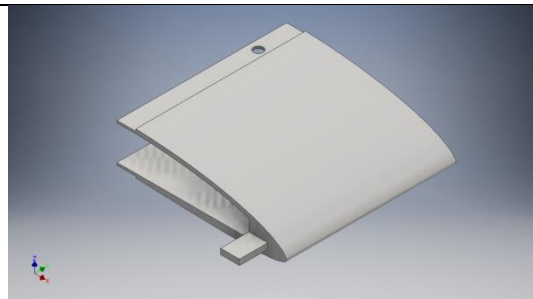


Fig. 9.2: Borde de ataque 2

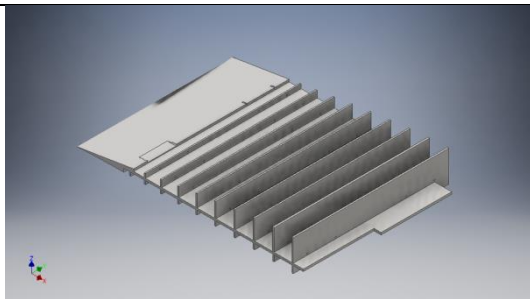


Fig. 9.3: Costilla 1

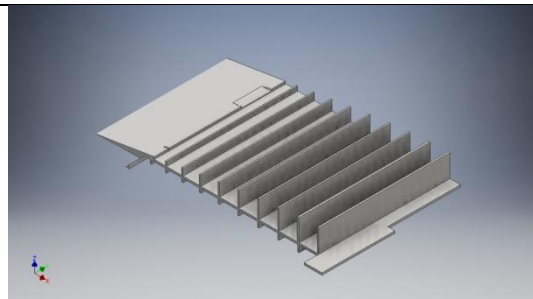


Fig. 9.4: Costilla 2



Fig. 9.5: Elemento de unión 1

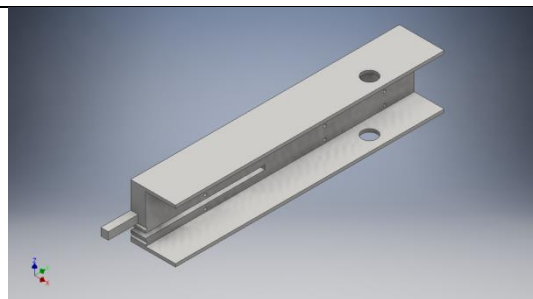


Fig. 9.6: Elemento de unión 2

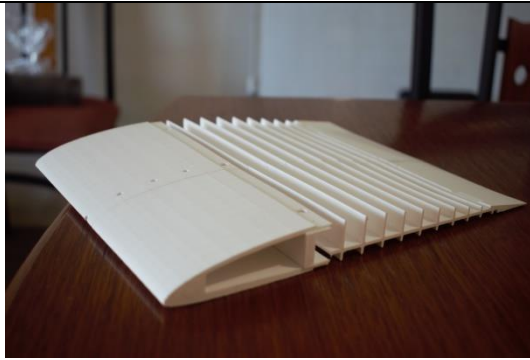


Fig. 9.7: Perfil 3D, vista en perspectiva

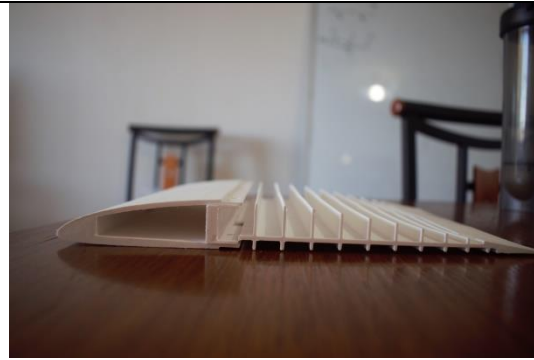


Fig. 9.8: Perfil 3D, vista lateral

Perfil alar	Eppler 387
Cuerda (c)	240 mm
Envergadura (b)	200 mm
Punto inicio de flexión x_s	$0.375c = 90 \text{ mm}$
Punto final de flexión x_e	$0.875c = 210 \text{ mm}$
Ancho de las vertebras	2 mm
Número de vertebras	9

Tabla 9.1: Características modelo 3D

Para generar la flexión necesaria en el borde de fuga, se crea un sistema formado por dos servos TowerPro SG90, un Arduino R1, un potenciómetro y una fuente de voltaje como alimentación (Fig. 9.9). El sistema electrónico permitiría producir un desplazamiento del borde de fuga mientras se realizan las pruebas en el túnel de viento. Tras varios intentos, se comprueba que el sistema funciona correctamente, pero, no tiene el torque necesario para generar la flexión de las costillas. Es por esto que se crea la tarea de analizar otros sistemas que permitan mantener la flexión.

Para finalizar el prototipo y prepara su posterior montaje para las pruebas, la parte superior y lateral del perfil se cubren con un plástico de x mm de ancho, flexible, y que se adapta a la superficie (Fig. 9.10 y 9.11). En la parte inferior se realizan dos orificios para el montaje con pernos M5 (Fig. 9.12).

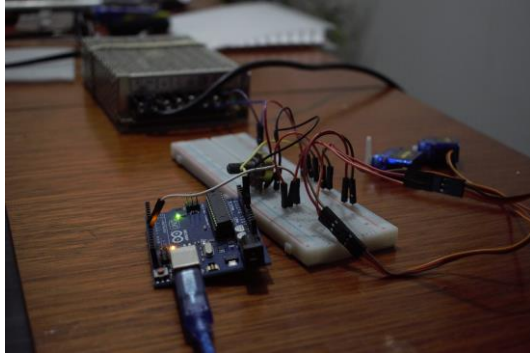


Fig. 9.9: Circuito servos



Fig. 9.10: Perfil 3D, vista lateral 1



Fig. 9.11: Perfil 3D, vista lateral 2



Fig. 9.12: Montaje pernos

10. Experimentos en túnel de viento

Se realizan una serie de ensayos aerodinámicos por cada modificación a estudiar. Con el fin de poder comparar las mediciones con las respectivas modificaciones. Lo primero a realizar es la línea base del perfil. Se realizan las mediciones de Lift y Drag para los casos 10, 15 y 20 [m/s], variando el ángulo de ataque desde 0 hasta 30°. Se realizan los mismos ensayos para los casos con modificaciones, las cuales incluyen dos tipos de tubérculos y un borde de fuga flexible.

Ensayos de línea base

El prototipo (Fig. 9.11) se monta en el soporte y se procede a encender el túnel con la manivela de velocidad en posición cerrada. Luego, se ajustan a cero la velocidad, Lift y Drag. Con estos pasos completados en el orden descrito, se puede proceder a realizar las mediciones.

En todas las mediciones se anotan las fuerzas, y luego se calculan los coeficientes de sustentación y arrastre según las fórmulas 4 y 5 respectivamente.

Se comprueba en los gráficos 10.1, 10.2 y 10.3 que el coeficiente de sustentación (C_l) del perfil alar tiene un comportamiento lineal frente al aumento del ángulo de ataque, al menos, hasta 30° de inclinación, que fue la máxima inclinación que se puede lograr con el soporte. También se comprueba de los mismos gráficos, el aumento exponencial del coeficiente de arrastre con respecto al ángulo de ataque. Los resultados se mantienen similares para 10, 15 y 20 [m/s]. Se observa que el C_l y C_d disminuyen en las pruebas a medida que se aumenta la velocidad.

En los ensayos no se observa el efecto de entrada en pérdida (Stall), que consiste en la disminución más o menos súbita de la fuerza de sustentación que genera la corriente incidente sobre el perfil. Esta, se produce generalmente cuando el ángulo de ataque, el que forma la cuerda del perfil alar con el flujo de aire, alcanza un cierto valor límite.

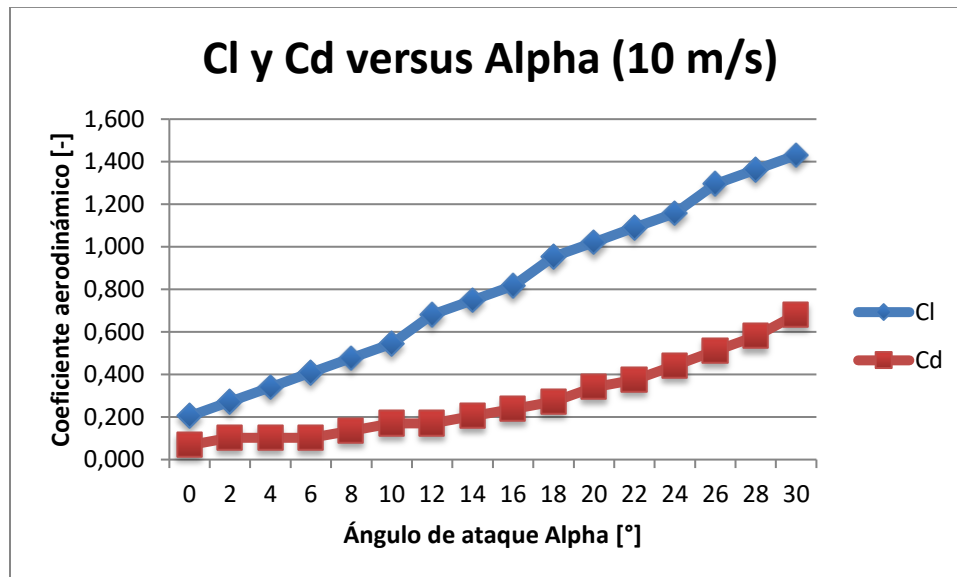


Gráfico 10.1: C_l y C_d versus Alpha (10 m/s), línea base.

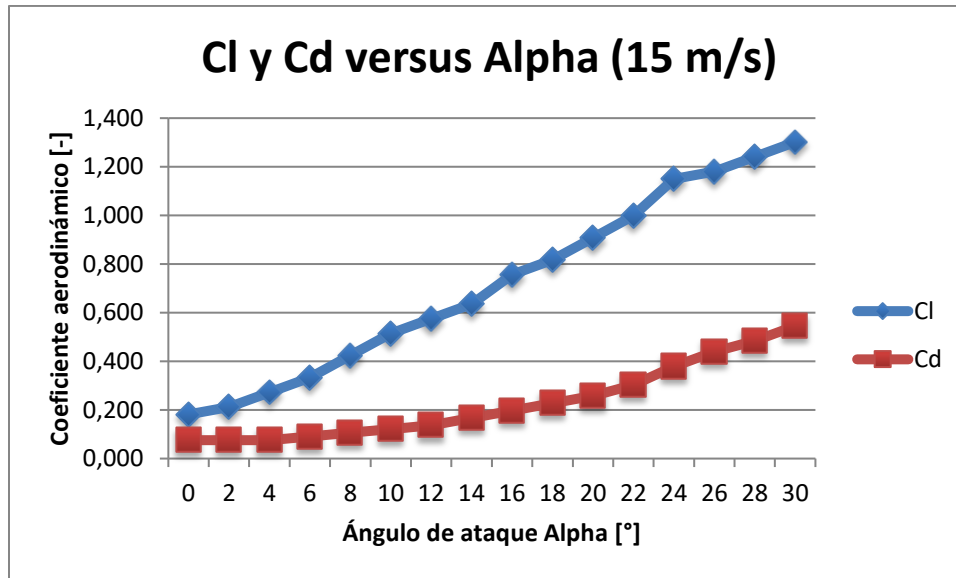


Gráfico 10.2: Cl y Cd versus Alpha (15 m/s), línea base.

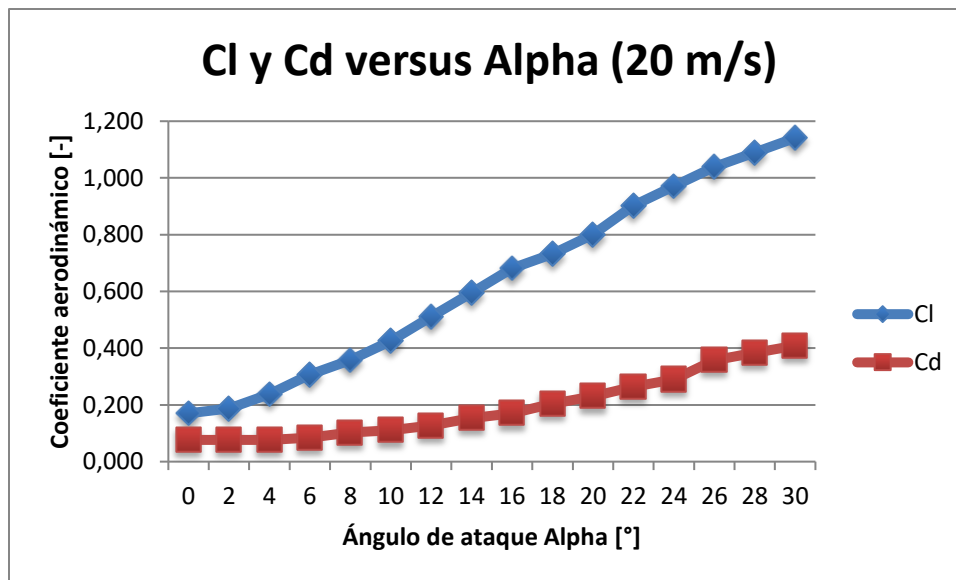


Gráfico 10.3: Cl y Cd versus Alpha (20 m/s), línea base.

Al comparar los resultados del ensayo 3D en XFLR5 (Gráfico 8.2.1), con los resultados del prototipo en la línea base, se destaca que el comportamiento de las curvas de Cl y Cd es similar, pero difieren en los valores exactos. El error entre el valor del Cl calculado versus el medido en el túnel, para el caso de 10° de ataque es de 13%, para 20° es 48%, y para 30° es 81%. El error entre el valor del Cd

calculado versus el medido en el túnel, para el caso de 10° de ataque es de 150%, para 20° es 110%, y para 30° es 116%.

Medición del efecto de tubérculos

Los tubérculos se moldean en macilla DAS y con ayuda de moldes para mantener uniformidad en su diseño. Las variables que se estudian en este ensayo son el espaciamiento y tamaño de tubérculos presentes en el perfil.

Se desea comprobar la hipótesis de que los tubérculos mejoran la sustentación en ángulos de ataque elevados. Por lo tanto, se fabrican modificaciones de tubérculos en el borde de ataque (Tubérculo “A” y Tubérculo “B”).

- Tubérculo “A”

El tubérculo A presenta una forma redondeada, similar a los tubérculos que se encuentran en las aletas de las ballenas jorobadas, se espera que produzcan una canalización del flujo y que con eso, las líneas de flujo se desprendan más tardíamente a lo largo del perfil.

El primer caso de estudio (Fig. 10.1) se incluye cuatro tubérculos en el borde de ataque y en el segundo caso se incluye siete (Fig. 10.2). Se realiza esta diferencia en los ensayos para comprobar la relación entre el espaciamiento, y su efecto en el arrastre y la sustentación.



Figura 10.1: Prototipo con modificación de Cuatro Tubérculos Centrales (4TC)



Figura 10.2: Prototipo con modificación de Siete Tubérculos Centrales (7TC)

Tubérculo “B”

El tubérculo B presenta una forma alargada, un tanto similar a los tubérculos que se estudian en Biomimética de Aeronaves, Debra Rich, 2007 [1]. Se espera que produzcan una canalización del flujo y que con eso, las líneas de flujo se desprendan más tardíamente a lo largo del perfil.

En el primer caso de estudio del tubérculo B (Fig. 10.3) se incluye cuatro tubérculos en el borde de ataque y en el segundo caso se incluye siete (Fig. 10.4). Se realiza esta diferencia en los ensayos para comprobar la relación entre el espaciamiento, y su efecto en el arrastre y la sustentación.



Figura 10.3: Prototipo con modificación de Cuatro Tubérculos Largos (4TL)



Figura 10.4: Prototipo con modificación de Siete Tubérculos Largos (7TL)

Comparación del C_l y C_d entre línea base y el caso con tubérculos

Se realiza la comparación gráfica entre los coeficientes de sustentación y arrastre porque se desea comprobar si existen diferencias en el desempeño. Se toma en cuenta solamente el caso de 4TC y 4TL y se compara con la línea base (LB), porque en ambos casos respectivos se obtienen mejores resultados que sus variantes (7TC y 7TL).

Se observan mejoras en la sustentación en las tres velocidades para las pruebas con tubérculos (Graf. 10.4, 10.5 y 10.6). La máxima mejora en comparación a la línea base es de un 22% a 15 [m/s] y 4° de inclinación (Graf. 10.5). Ambos tipos de tubérculos (TL y TC) presentan resultados similares a 10 [m/s] (Gráficos 10.3 y

10.7). Se utilizan los modelos 4TC y 4TL porque presentan mejores resultados que 7TC y 7TL. El promedio de mejoras (%) en función del ángulo de ataque es mayor para el modelo TC (Tabla 10.1). El promedio de mejora para 4TC es de 14,6% y de 12,4% para 4TL a 15 [m/s] y de 15,8% y 11,9% a 20 [m/s] respectivamente (Tabla 10.1). A 10 [m/s] las mejoras son leves y no superan el 14% (Tabla 10.1).

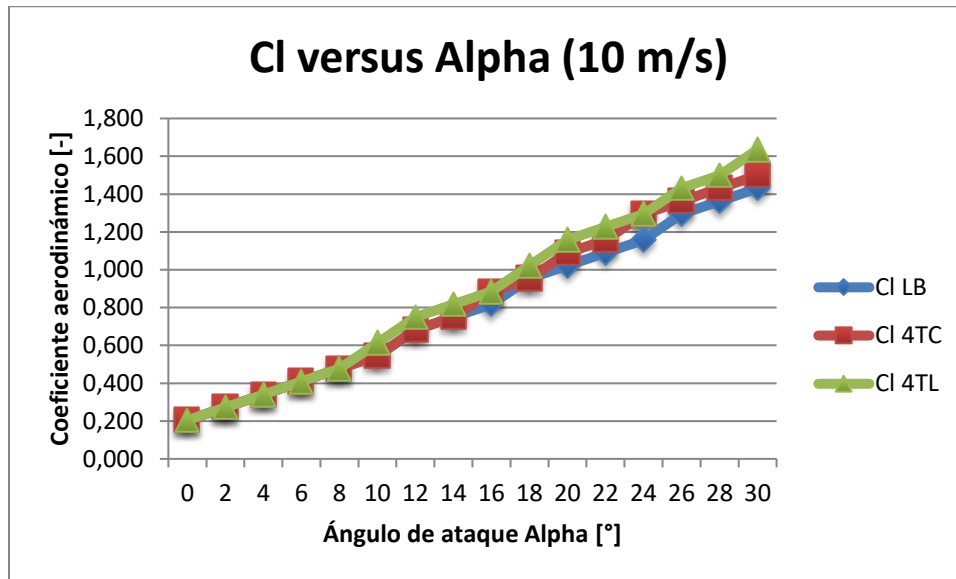


Gráfico 10.4: CI versus Alpha (10 m/s), LB, 4TC, 4TL.

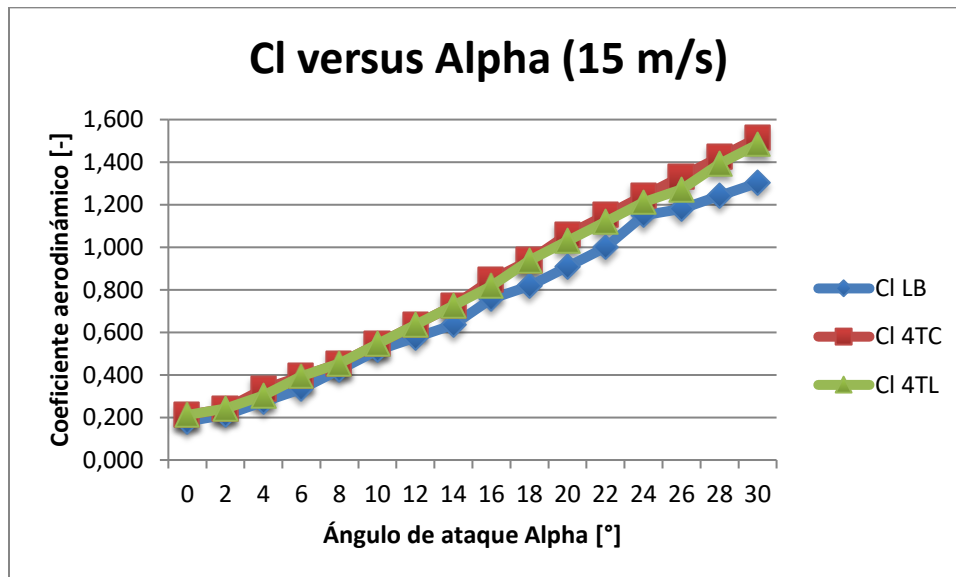


Gráfico 10.5: CI versus Alpha (15 m/s), LB, 4TC, 4TL.

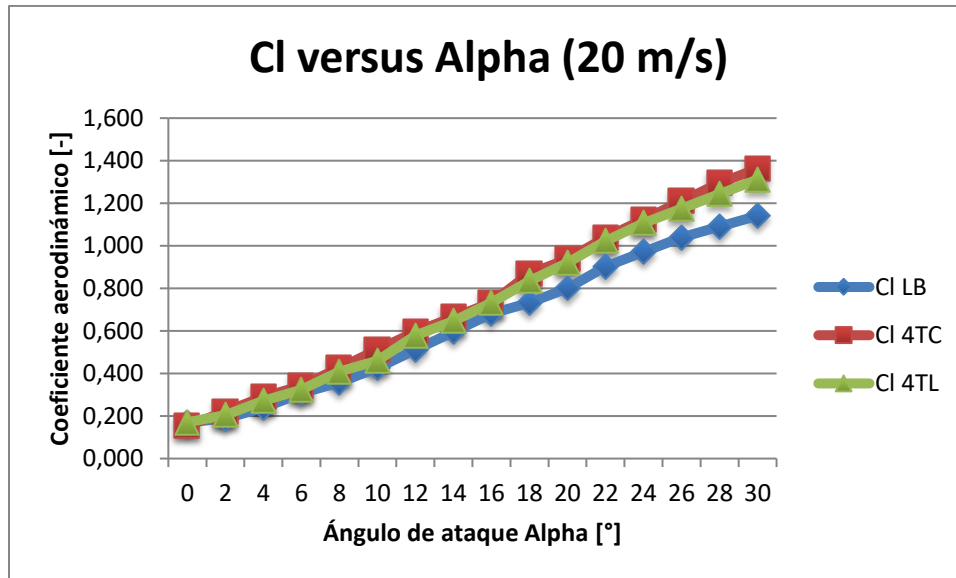


Gráfico 10.6: Cl versus Alpha (20 m/s), LB, 4TC, 4TL.

Ángulo	% Mejora en Cl 10 m/s		% Mejora en Cl 15 m/s		% Mejora Cl 20 m/s	
	4TC	4TL	4TC	4TL	4TC	4TL
0	0%	0%	17%	17%	-10%	0%
2	0%	0%	14%	14%	18%	9%
4	0%	0%	22%	11%	21%	14%
6	0%	0%	18%	18%	11%	6%
8	0%	0%	7%	7%	19%	14%
10	0%	13%	6%	6%	20%	8%
12	0%	10%	11%	11%	17%	13%
14	0%	9%	14%	14%	11%	9%
16	8%	8%	12%	8%	8%	8%
18	0%	7%	15%	15%	19%	14%
20	7%	13%	17%	13%	17%	15%
22	6%	13%	15%	12%	15%	13%
24	12%	12%	8%	5%	16%	14%
26	5%	11%	13%	8%	16%	13%
28	5%	10%	15%	12%	19%	14%
30	5%	14%	16%	14%	19%	15%

Tabla 10.1: % de mejora en Cl de las modificaciones 4TC y 4TL

Se observan aumentos no menores en el coeficiente de arrastre (C_d) para los casos con tubérculos para las velocidades 15 y 20 [m/s] (Gráficos 10.8 y 10.9). En especial para ángulos elevados de ataque. Esta variable no se estudia a fondo porque no es de estudio primordial en el diseño del generador eólico modular.

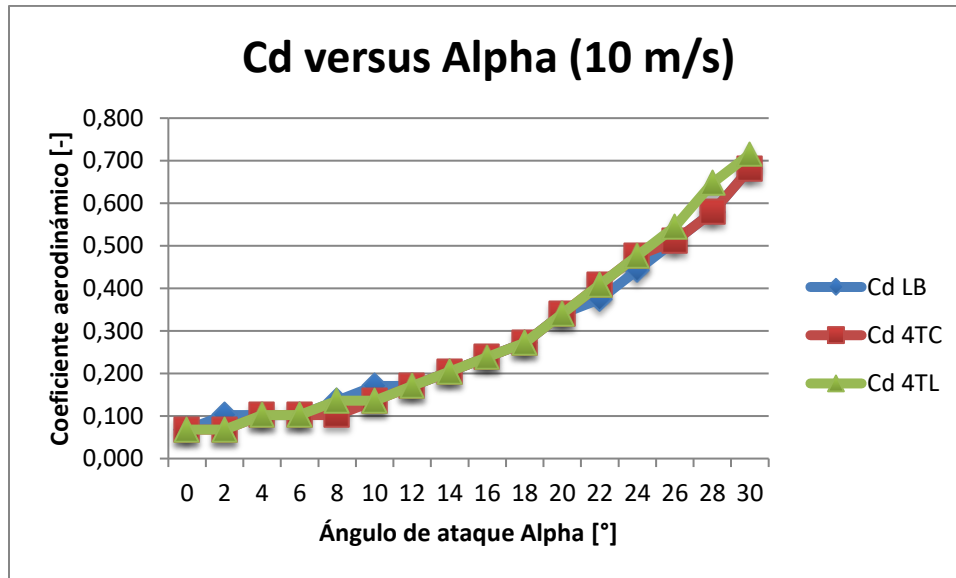


Gráfico 10.7: Cd versus Alpha (10 m/s), LB, 4TC, 4TL.

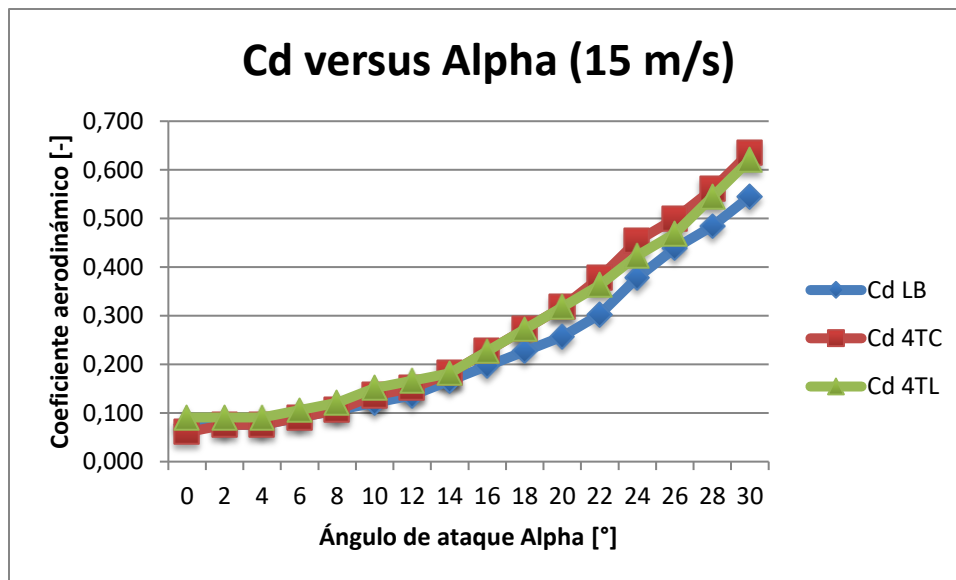


Gráfico 10.8: Cd versus Alpha (15 m/s), LB, 4TC, 4TL.

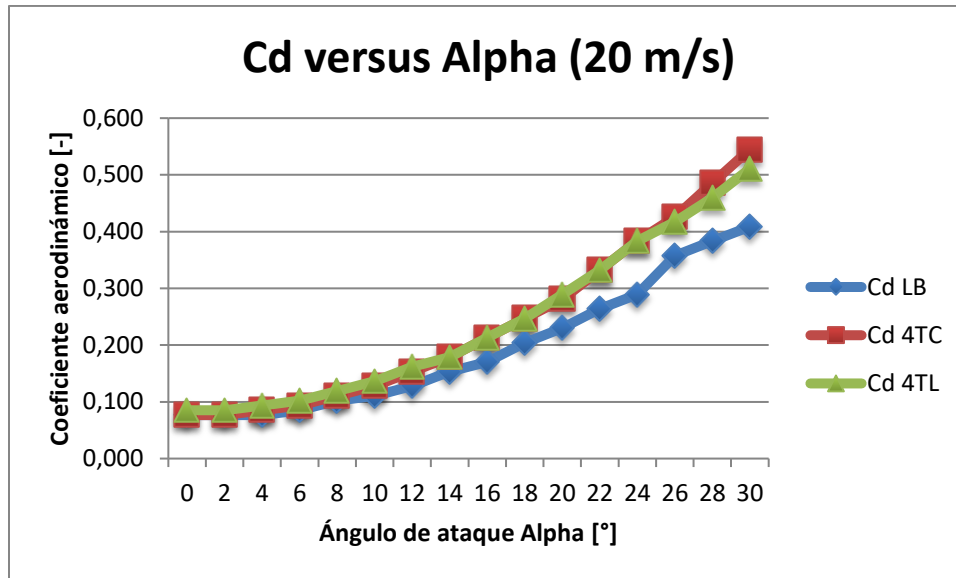


Gráfico 10.9: Cd versus Alpha (20 m/s), LB, 4TC, 4TL.

Ensayos perfil en flexión

A continuación se presentan los dos casos de estudio del perfil en flexión. En el primer caso (Fig. 10.5) se observa un perfil con un desplazamiento de la cuerda de 10 [mm]. En el segundo caso (Fig. 10.6) se observa un perfil con un desplazamiento de 20 [mm] de la cuerda. Se realiza este ensayo para comprobar la relación entre el desplazamiento de la cuerda, y su efecto en el arrastre y la sustentación. La curvatura del perfil se consigue flectando manualmente las costillas del perfil y se mantiene en las pruebas gracias a elásticos ubicados transversalmente.

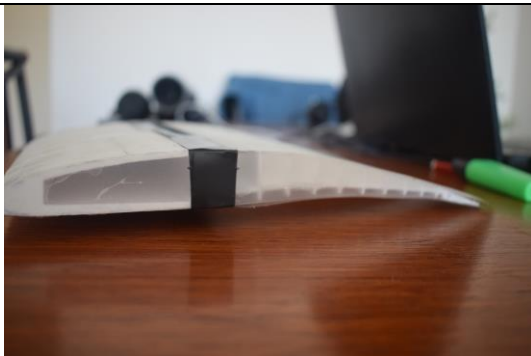


Figura 10.5: Prototipo con desplazamiento de 10 mm (PD1)

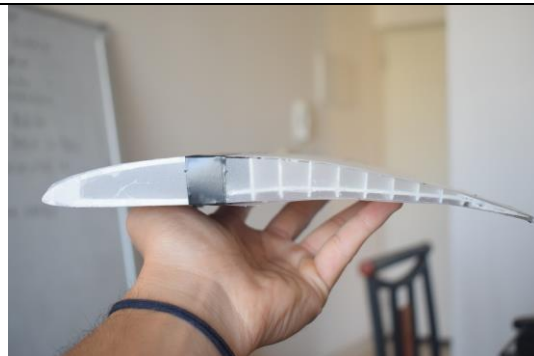


Figura 10.6: Prototipo con desplazamiento de 20 mm (PD2)

Con las mediciones de Lift y Drag se obtienen los gráficos de Cd y Cl versus ángulo de ataque, estos, corresponden al perfil en las condiciones de línea base (LB), con desplazamiento de 10 mm (Flex 1) y con desplazamiento de 20 mm (Flex 2). Los ensayos se realizan a 10, 15 y 20 [m/s] al igual que las pruebas con tubérculos y la línea base.

El perfil Flex 2 presenta mejoras en la sustentación en comparación de la línea base en las tres velocidades estudiadas (Gráficos 10.10, 10.11, 10.12), mientras que el perfil Flex 1 ofrece resultados por debajo de la línea base en los mismos casos. Esto, se puede interpretar asumiendo que existe un desplazamiento X_{crit} que marca la diferencia entre mejorar o empeorar el desempeño de la sustentación, y que se encuentra entre $10\text{ mm} \leq X_{crit} \leq 20\text{ mm}$, o también, se puede interpretar como un error en el montaje y mediciones del perfil Flex 1. No es concluyente por la falta de pruebas.

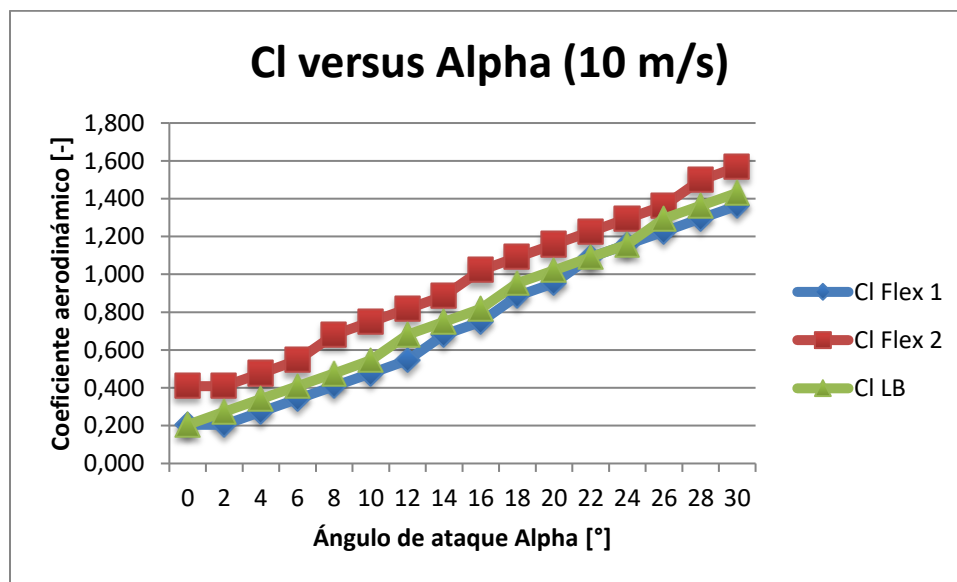


Gráfico 10.10: Cl versus Alpha (10 m/s), LB, Flex 1, Flex 2.

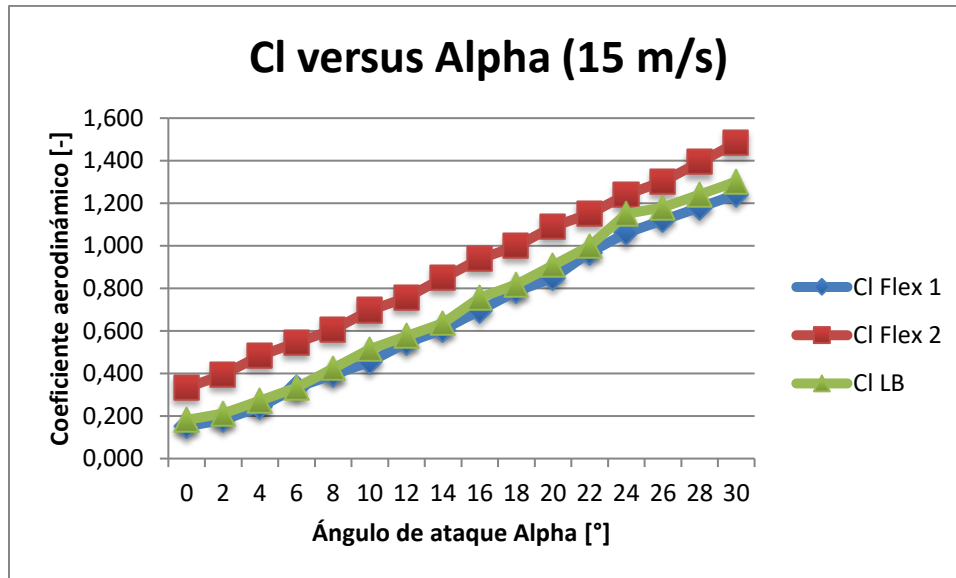


Gráfico 10.11: Cl versus Alpha (15 m/s), LB, Flex 1, Flex 2.

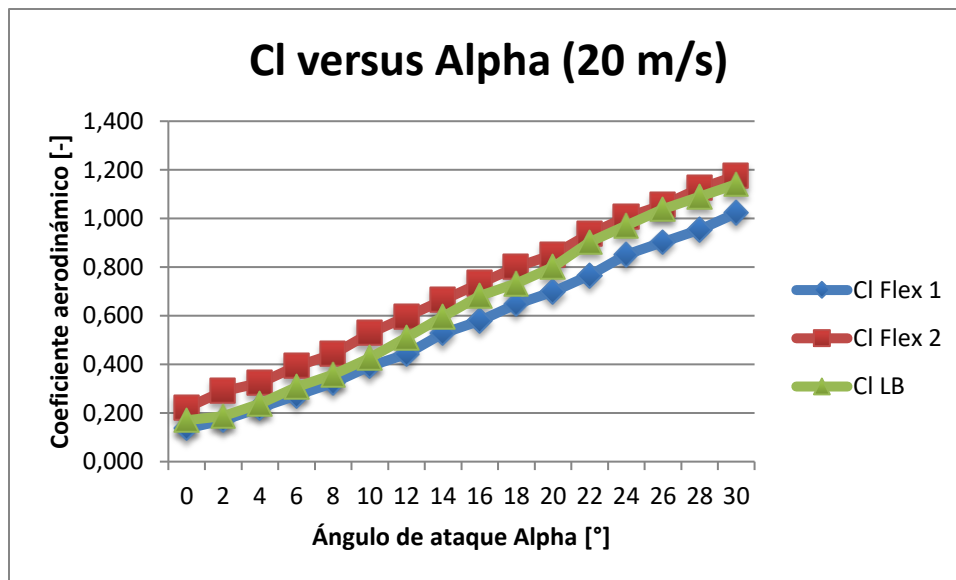


Gráfico 10.12: Cl versus Alpha (20 m/s), LB, Flex 1, Flex 2.

Según los resultados del marco de referencias, se esperaba que las curvas de C_d para Flex 1 y Flex 2 estuvieran por debajo de las curvas de LB. Esto no fue así para la configuración Flex 2 porque hubo aumentos significativos en C_d (Gráficos 10.12 y 10.13). Hubo un caso excepcional para la configuración Flex 1 a 20 [m/s] (Gráf. 10.15), luego de los 10° de ángulo de ataque el C_d se mantiene bajo la curva de la línea base.

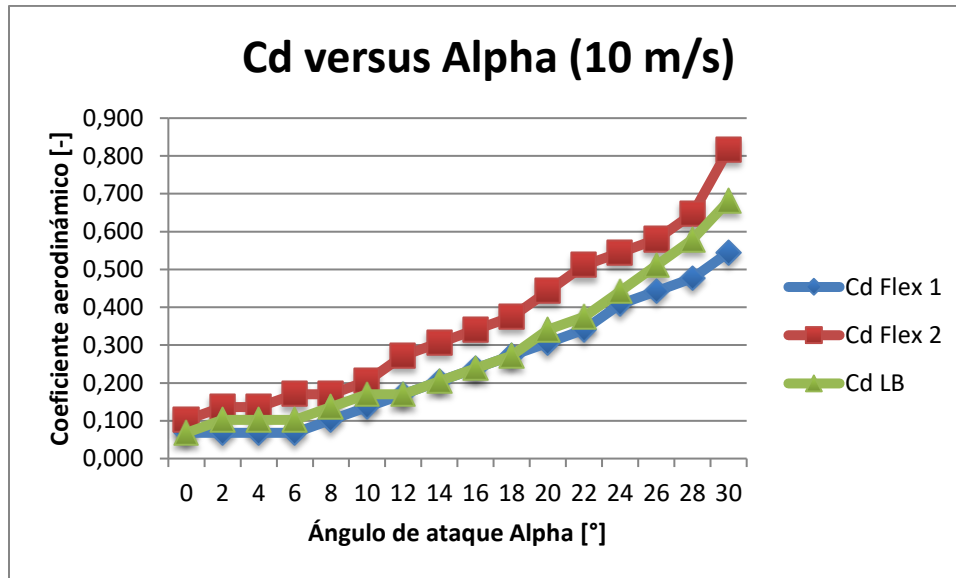


Gráfico 10.13: Cd versus Alpha (10 m/s), LB, Flex 1, Flex 2.

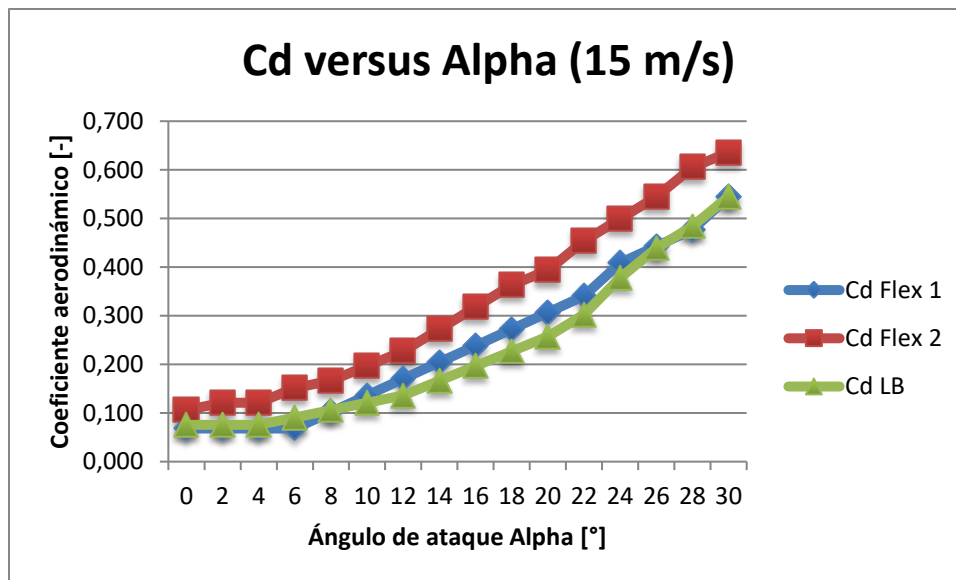


Gráfico 10.14: Cd versus Alpha (15 m/s), LB, Flex 1, Flex 2.

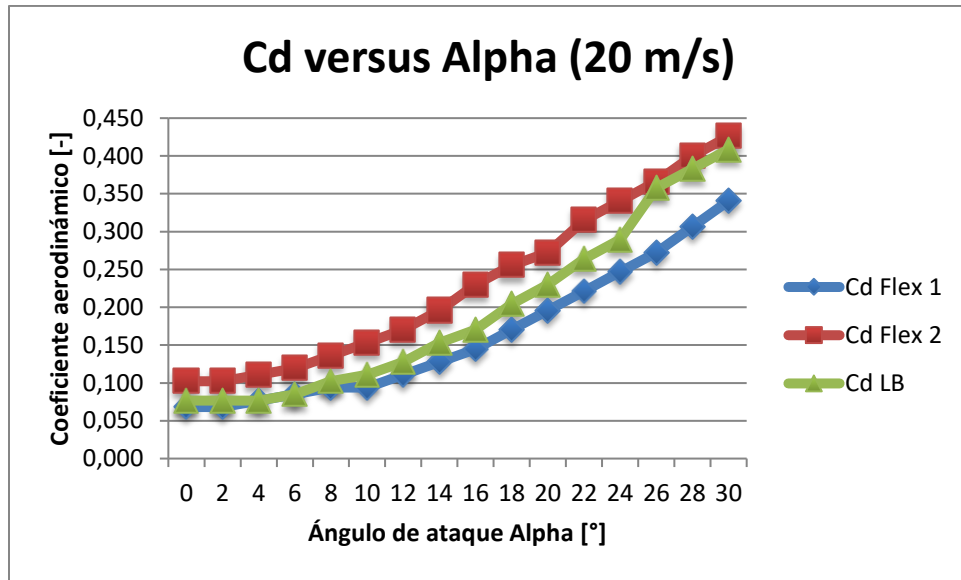


Gráfico 10.15: Cd versus Alpha (20 m/s), LB, Flex 1, Flex 2.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La continua investigación e innovación permite hacer más eficiente los procesos industriales. En este caso, se estudia el aprovechamiento energético de fuentes eólicas, a través de un generador impulsado gracias a la fuerza de sustentación que entrega un perfil aerodinámico con aplicación de la biomimética, como vector que impulsa la eficiencia.

En este trabajo se investiga sobre las diferentes características que les brindan una ventaja a los animales en su medio natural. Se comprueba por los ensayos realizados que los tubérculos que poseen las ballenas jorobadas en sus aletas (Tabla 10.1), les proporcionan una ventaja en sustentación a la hora de desplazarse en ángulos de ataque elevado, comportamiento observado en sus actividades de caza.

El vuelo del albatros [14], en particular, su manera de ascender y descender sólo gracias a las corrientes de aire, permite idear una solución que utilice las corrientes de aire cambiantes como zonas costeras o entre ciudades. Se plantean soluciones modulares de movimiento lineal o circular que impulsen un perfil alar y con eso, mover electroimanes para la conversión a energía eléctrica (Fig. 1.11).

Se analiza el modelo FishBAC (Fig. 1.14), planteado por Benjamín Woods en varios de sus trabajos. En este modelo, se plantean mecanismos de flexión para el borde de fuga, con el fin de asimilar una posición contraída del perfil alar. Esta similitud a la contracción continua en el movimiento de peces y mamíferos acuáticos, les permite movilizarse maximizando el empuje. Este modelo se caracteriza por tener un borde de ataque rígido, una “espina dorsal” flexible, y un mecanismo interno que permite la contracción continua.

Para reproducir un perfil con tales características biomiméticas, la mejor opción para prototipar es utilizar impresión 3D. Por la disponibilidad se utiliza plástico ABS, sin embargo, existen diversos filamentos según la necesidad. Se recomienda utilizar el plástico ABS en el borde de ataque y el borde de fuga porque bajo sollicitaciones de tracción y flexión se mantiene rígido. Se recomienda utilizar

filamento “Flex Smartfil” para las costillas porque se flexiona con menor tracción (ejerciendo una fuerza puntual desde el borde de ataque) que otros filamentos.

Los servomotores “Tower Pro Sg90” (un modelo bastante utilizado en electrónica) no tienen el torque suficiente para producir la flexión necesaria de las costillas impresas en plástico ABS. Se utiliza estos servos poseer el tamaño adecuado para ser implementados dentro borde de ataque del perfil.

El túnel de viento (Fig. 7.1) del Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM, casa central tiene la resolución y el rango suficientes para medir las fuerzas de sustentación y arrastre que se generan en los rangos de velocidad (de 0 a 20 m/s) y de ángulo de ataque (0 a 30°) aplicados en las pruebas. Se realizan pruebas de calibración para comprobar la validez de las mediciones, las cuales, tuvieron resultados positivos. No se recomienda utilizar ángulos elevados de ataque a velocidades sobre 20 [m/s], porque la aguja del equipo oscila entre el rango de medición y esta se vuelve confusa.

La puesta en marcha del túnel debe tener en cuenta el ajuste a cero de la velocidad, lift y drag, esta, se debe realizar luego de encender el túnel con la manivela que controla la velocidad completamente cerrada. También, se debe sellar las aperturas laterales y los orificios porque afectan la medición.

El diseño del perfil toma en cuenta las dimensiones mínimas para que quepa un artefacto dentro del borde de ataque que permita la flexión de las costillas, y también, las dimensiones máximas para ser impreso en una impresora 3D y para que quepa dentro de la cámara de medición del túnel de viento. De los cálculos se diseña un perfil de 200 [mm] de envergadura y 240 [mm] de cuerda. La relación entre estas variables no es la óptima para realizar mediciones sobre este perfil, porque los efectos de borde de ala son considerables con una relación C/B (cuerda sobre envergadura) tan baja.

El diseño del perfil incluye un estudio 2D y 3D con software XFLR5 (Gráf. 8.1.1 y 8.2.1). El diseño del perfil impreso en 3D se realiza en Inventor Professional 2017 (Fig. 8.3.1).

En este proceso se unen los elementos para dar forma final al prototipo. El plástico ABS se une de manera permanente con un pegamento de soldadura plástica. El exterior se recubre con una mica de plástico flexible (Figuras 9.10 y 9.11). Se realiza una unión con pernos al soporte del perfil. Los tubérculos son fabricados con moldes y hechos en macilla DAS. La flexión se logra con dos costillas de menor envergadura.

El error al comparar los resultados del ensayo 3D en XFLR5 con los resultados del prototipo en la línea base causa inquietud a primera vista. Sin duda hay una decena de factores que influyen en la diferencia de ambos valores. Por parte de la simulación, se sabe que el cálculo de la distribución de sustentación, los ángulos inducidos y la resistencia inducida se realiza de manera no viscosa y lineal, o también vale decir, usando la aproximación del aire como flujo incompresible, la cual, no es completamente exacta. Por parte del ensayo en el túnel de viento, se puede mencionar que las mediciones están sujetas a error debido a, el proceso de calibración manual, la oscilación de las agujas de medición del Lift y Drag, el ajuste del punto de unión entre el soporte del perfil y el perfil (holgura que aumentaba con la velocidad), la exactitud de la velocidad medida por el tablero y el ángulo medido por el soporte (tornillo suelto), la hermeticidad de las puertas del túnel, y al mismo soporte que induce arrastre por su cuenta.

En los resultados de los ensayos se obtuvieron mejoras en la fuerza de sustentación de las variaciones con tubérculos (Tabla 10.1) y perfiles flexibles (Gráficos 10.10, 10.11 y 10.12). Se comprueba parte de las hipótesis desarrolladas sobre los tubérculos en investigaciones expuestas en el marco teórico.

Se recomienda estudiar, diseñar y aplicar principios de biomimética porque puede resultar en mejoras en el desempeño de perfiles alares. Estos aumentos en sustentación y arrastre se pueden aplicar para diseñar equipos eólicos modulares basados en perfiles alares. El aprovechamiento energético se puede conseguir principalmente con dos sistemas (lineal y circular). El sistema lineal toma en cuenta sólo los resultados de sustentación porque el perfil se mueven en dirección

vertical, mientras que, el sistema circular toma en cuenta sustentación y arrastre porque se requiere definir cuatro sectores en cual maximizar la fuerza resultantes. Se recomienda repetir ensayos con equipamiento de mayor precisión y analizar el efecto de borde de ala para próximas experiencias. También, estudiar el efecto de la pérdida de sustentación o “Stall” en el perfil, el cual, no se encontró antes de los 30°. Esto permite, seguir aumentando el ángulo de ataque y seguir ganando sustentación. En caso de hacer relevante el arrastre en el sistema energético, se recomienda encontrar el ángulo que maximiza la sustentación y minimiza el arrastre.

La definición de pruebas de experimentos y protocolos de ensayo fue un desafío en el túnel de viento, partiendo por la calibración manual en el ajuste de las tuercas que regulan la inercia de la aguja de medición, el reajuste a cero de las perillas luego de cada ensayo, la mantención del laboratorio, la sujeción de la probeta, la oscilación constante a altas velocidades de la aguja de Lift y Drag, y la falta de ajuste en la medición de ángulo de ataque en el eje que soporta el prototipo. La falta de un sistema más preciso para la toma de datos y el efecto de borde de ala, que por las dimensiones máximas de impresión 3D y de la cámara de medición en el túnel de viento, se tuvo que admitir, generan datos de poca confiabilidad, que, aunque son la base para estudios posteriores, no permiten validar todas las hipótesis.

REFERENCIAS

1. Aircraft Biomimetics, Debra Rich, Carmen Prieto, Julian Crawford. (2007).
2. Analysis of Leading Edge Tubercles Impact on Airfoil Performance, Professor J. M. Cimbala, Penn State University. (2012).
3. Biomimetics: Determining engineering opportunities from nature, Frank E. Fish, Department of Biology, West Chester University, West Chester, PA 19383 USA.
4. Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S. and Yue, D. K. P., "Hydrodynamics of fishlike swimming," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32, 33-53 (2000).
5. Van Dam, C. P., "Efficiency characteristics of crescent-shaped wings and caudal fin," *Nature* 325, 435-437 (1987).
6. Liu, P. and Bose, N., "Hydrodynamic characteristics of a lunate shape oscillating propulsor," *Ocean Eng.* 26, 519-529 (1999).
7. Prempraneerach, P., Hover, F. S. and Triantafyllou, M. S., "The effect of chordwise flexibility on the thrust and efficiency of a flapping foil," 13th Internat. Symp. Unmanned Untethered Submersible Tech. (2003).
8. Fish, F. E. and Battle, J. M., "Hydrodynamic design of the humpback whale flipper," *J. Morph.* 225, 51-60 (1995).
9. Camilla Pandolfi and Dario Izzo, "Biomimetics on seed dispersal: survey and insights for space exploration", *Bioinspir. Biomim.* 8 (2013).
10. Azuma A and Yasuda K 1989 Flight performance of rotary seeds *J. Theor. Biol.* 138 23–53
11. Lentink D, Dickson W, Van Leeuwen J and Dickinson M 2009 Leading-edge vortices elevate lift of autorotating plant seeds *Science* 324 1438
12. Azuma A and Okuno Y 1987 Flight of a samara, *Alsomitra macrocarpa* *J. Theor. Biol.* 129 263–74
13. Minami S and Azuma A 2003 various flying modes of wind-dispersal seeds *J. Theor. Biol.* 225 1–14
14. Günther Pfeifhofer*, Helmut Tributsch, "The Flight of Albatross—How to Transform It into Aerodynamic Engineering?", Carinthia University of Applied Sciences, Villach, Austria, 12 June 2014.
15. Munson, B.R., Okiishi, T.H., Young, D.F. (2002) Fundamentals of Fluid Mechanics. 4th Edition, R. R. Donnelley & Sons, Chicago.
16. Julio Gratton, Introducción a la mecánica de fluidos, 2012.

17. John D. Anderson Jr., Fundamentals of Aerodynamics McGraw-Hill Science Engineering Math, 2010.
18. C. Gherardelli, Capitulo 10: Capa límite, U. de Chile.
19. B. K. S. Woods, College of Engineering, Preliminary Investigation of a Fishbone Active Camber Concept, Swansea University, Stone Mountain, Georgia, USA, 2012.
20. B. K. S. Woods, O. Bilgen and M. I. Friswell, Wind Tunnel Testing of the Fish Bone Active Camber Morphing Concept, Swansea University, College of Engineering, 2012, Nanjing, China.
21. B. K. S. Woods, J. H. S. Fincham, Michael I. Friswell, Aerodynamic Modelling of the Fish Bone Active Camber Morphing Concept, Swansea University, Swansea, UK.
22. Mecánica de fluidos, Capa límite y flujo externo compresible
23. Iman Dayyani, Hamed Haddad Khodaparast, Benjamin KS Woods and Michael I Friswell, The design of a coated composite corrugated skin for the camber morphing airfoil, College of Engineering, Swansea University, Swansea, UK.
24. Aeronáutica General, Aerodinámica de perfiles, capítulo 3. Ing. Gustavo H. Scarpin, Instituto Universitario Aeronáutico, Córdoba, 2002.
25. Apéndice C, Manual XFLR 5.
26. Correlaciones para coeficiente de arrastre de una esfera, Instituto Tecnológico de Durango, Carlos Francisco Cruz Fierro, 2005.

ANEXOS

Anexo A: Figuras

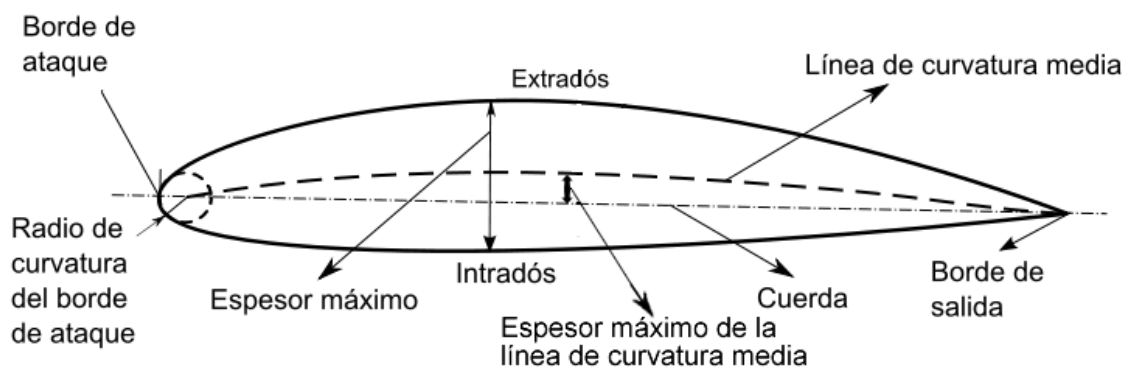


Figura 1.A: Variables geométricas de un perfil alar

Anexo B: Tablas

Familias	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
Cuatro cifras	Buenas características de entrada en pérdida. El movimiento del centro de presiones es pequeño en un amplio rango de velocidades La rugosidad tiene poco efecto	Coefficiente de sustentación máximo, bajo. Resistencia relativamente alta. Momento de cabeceo alto	Aviación ligera o general. Estabilizadores horizontales Perfiles simétricos Jets supersónicos Palas de helicópteros. Aletas de misiles
Cinco cifras	Coefficiente de sustentación más alto Momento de cabeceo bajo La rugosidad tiene poco efecto	Características de entrada en pérdida, pobres. Resistencia relativamente alta	Aviación general Pequeños turbohélices Jets de negocios
Serie 1	No presenta picos de baja presión Baja resistencia a alta velocidad	Sustentación relativamente baja	Hélices de avión Hélices de barco
Serie 6	Coefficiente de sustentación máximo alto Muy baja resistencia en un rango de condiciones de operación pequeño Óptimo para altas velocidades	Alta resistencia fuera del rango de operación óptimo Momento de cabeceo alto. Características de entrada en pérdida, pobres. Muy sensible a la rugosidad	Jets de negocios Aviones de entrenamiento Jets supersónicos
Serie 7	Muy baja resistencia en un rango de condiciones de operación pequeño Momento de cabeceo bajo	Coefficiente de sustentación máximo, bajo. Alta resistencia fuera del rango de operación óptimo. Características de entrada en pérdida, pobres. Muy sensible a la rugosidad	Raramente utilizados
Serie 8	Desconocidas.	Desconocidas.	Muy raramente utilizados

Tabla 1.B: Ventajas, inconvenientes y aplicaciones de las series NACA de perfiles alares.

Anexo C: Gráficos

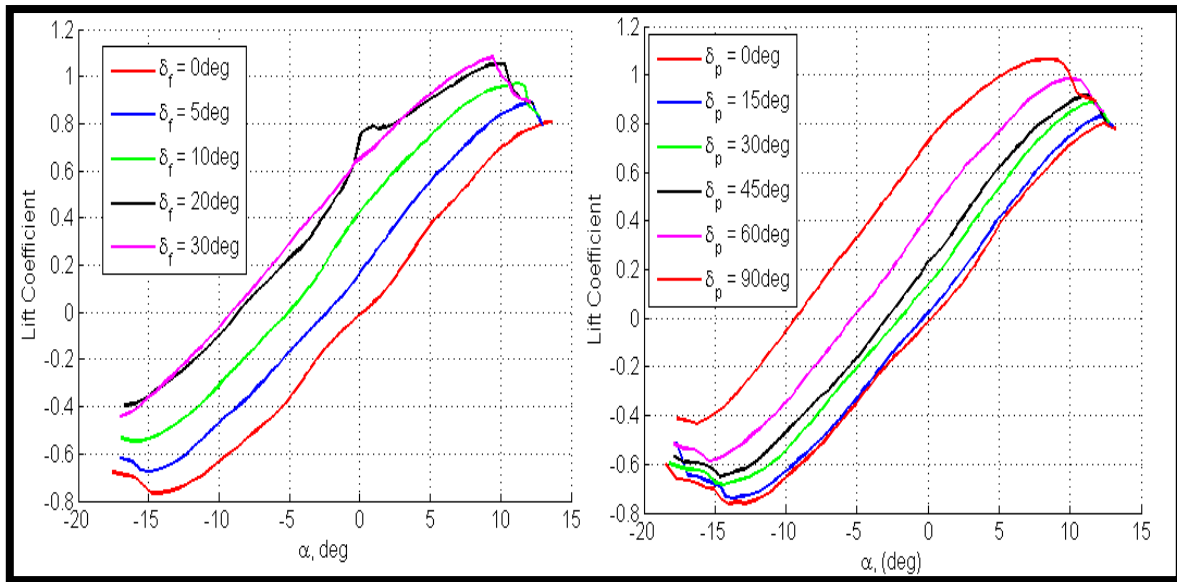


Gráfico 5.C: Coeficiente de sustentación v/s ángulo de ataque para modelo NACA (izquierda) y FishBAC (derecha)

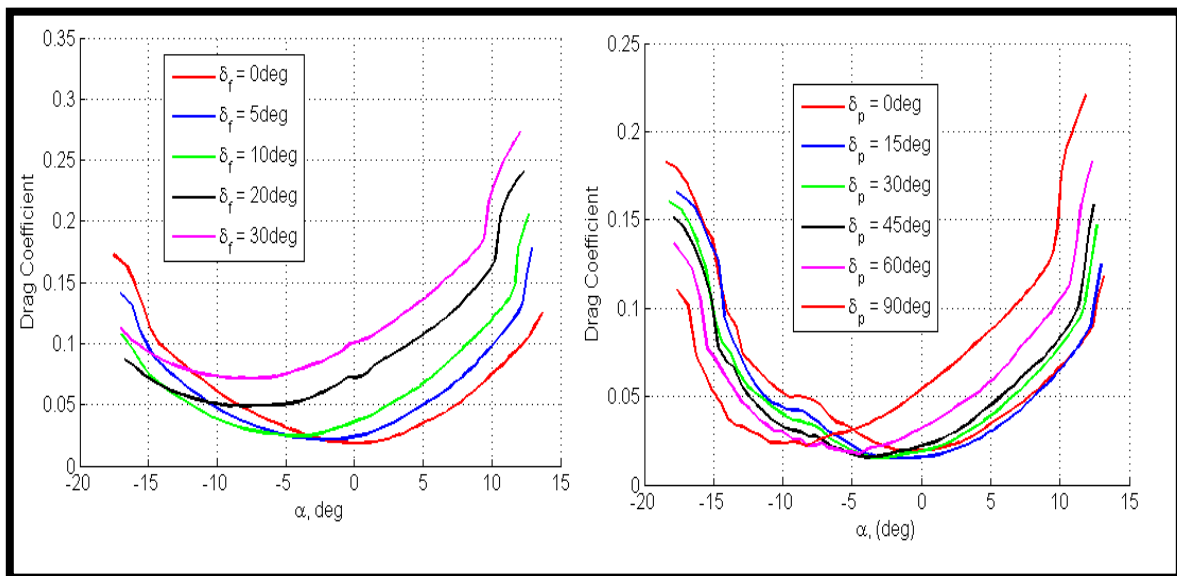


Gráfico 6.C: Coeficiente de arrastre v/s ángulo de ataque para modelo NACA (izquierda) y FishBAC (derecha)

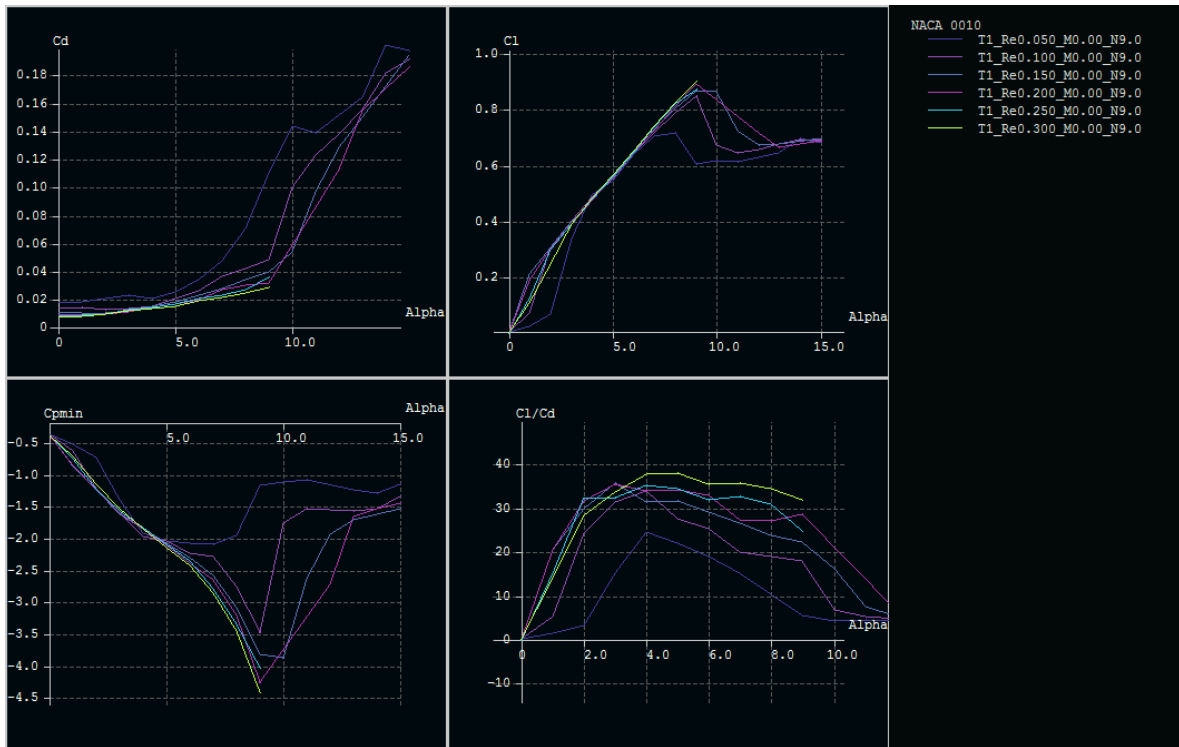


Gráfico 9.C: Simulación Naca 0018

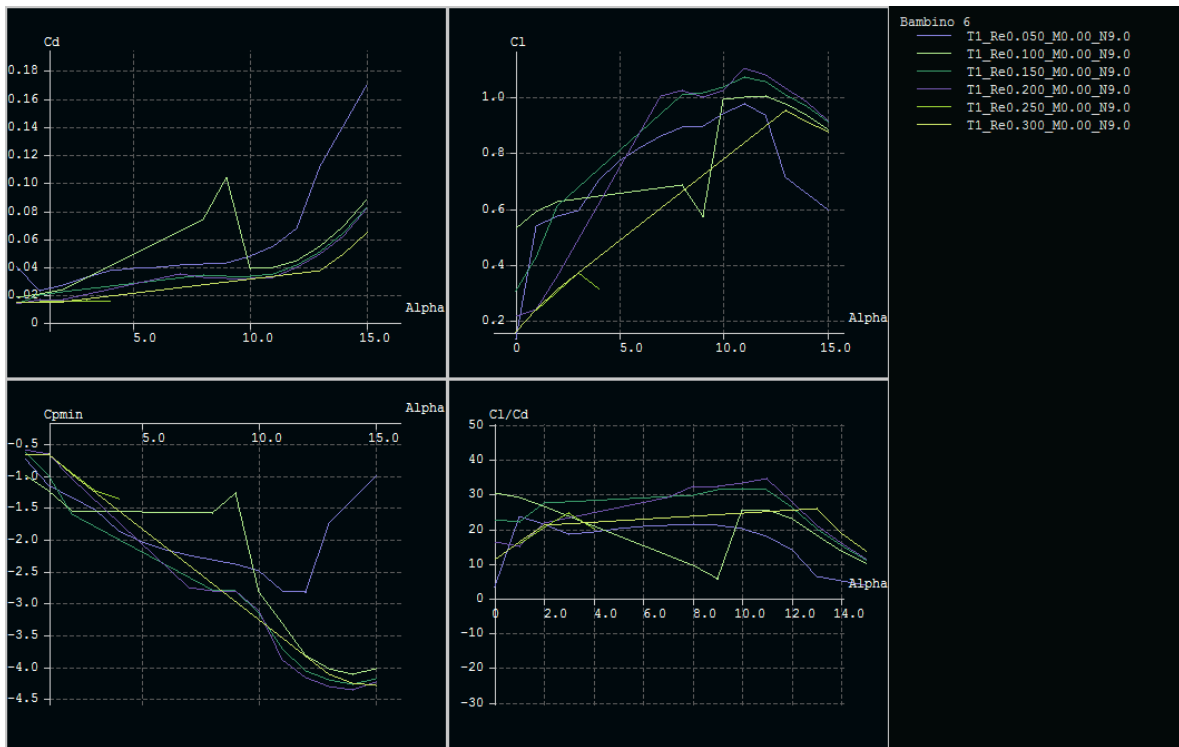


Gráfico 10.C: Simulación Bambino

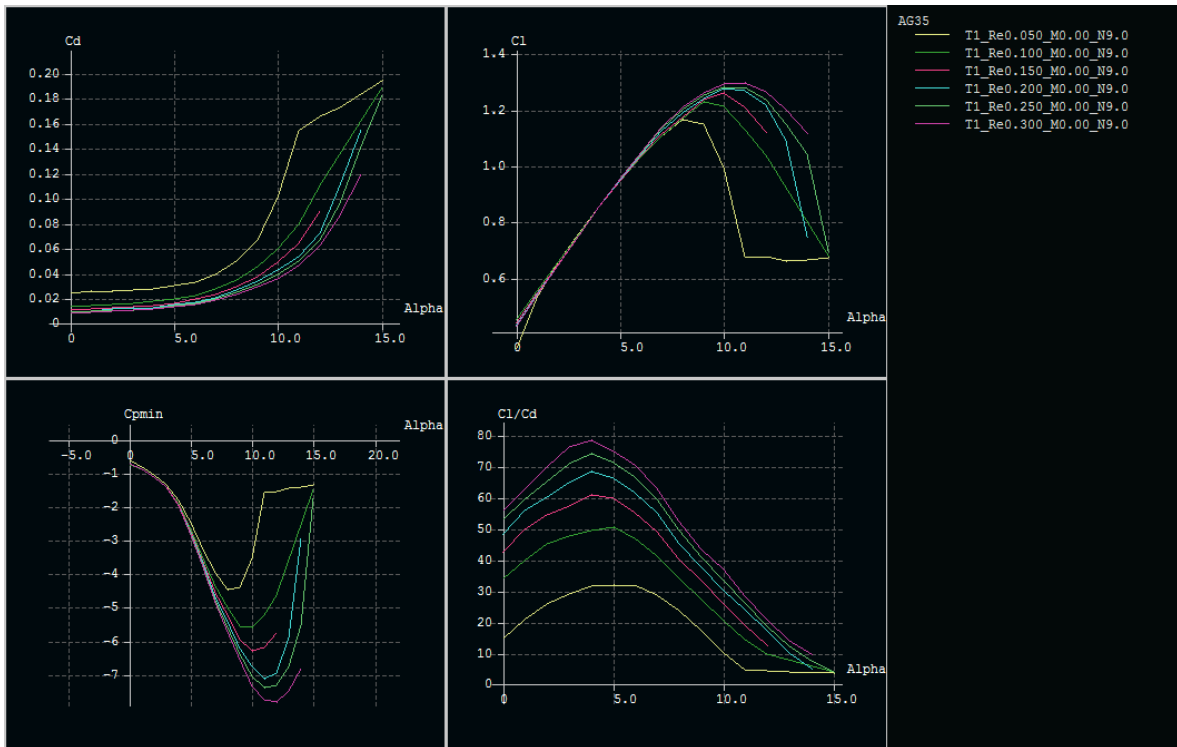


Gráfico 11.C: Simulación AG 35

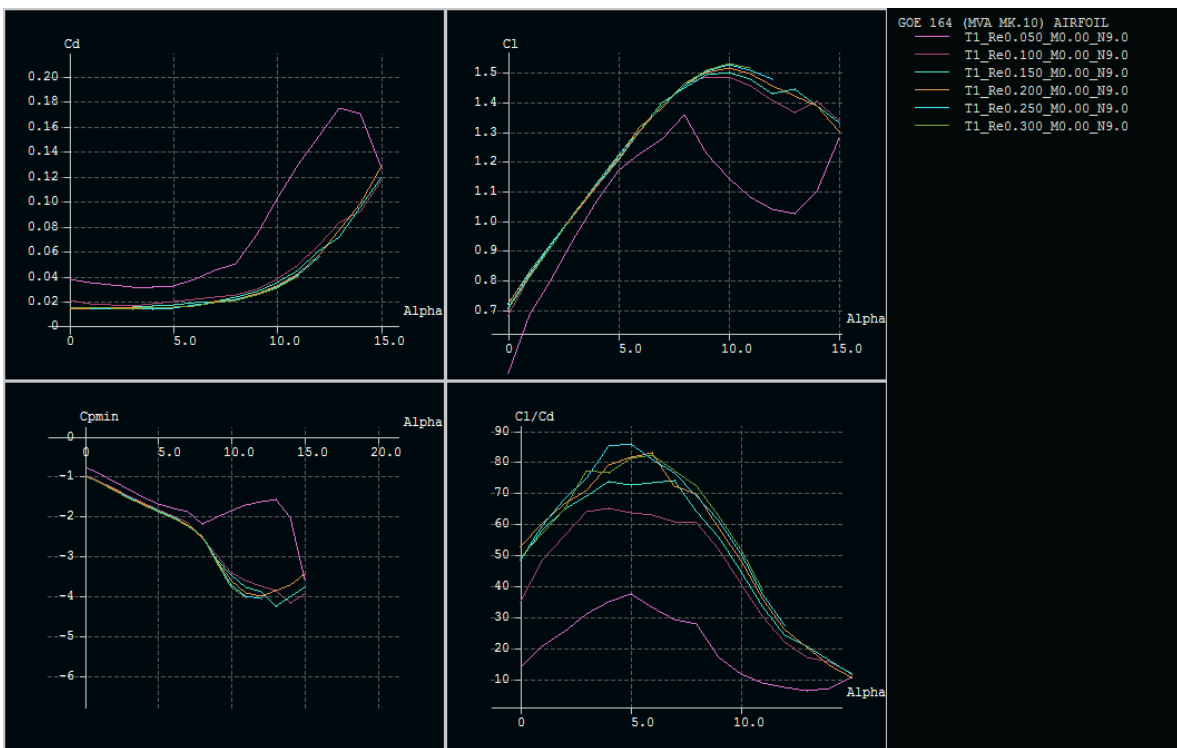


Gráfico 12.C: Simulación GOE 164

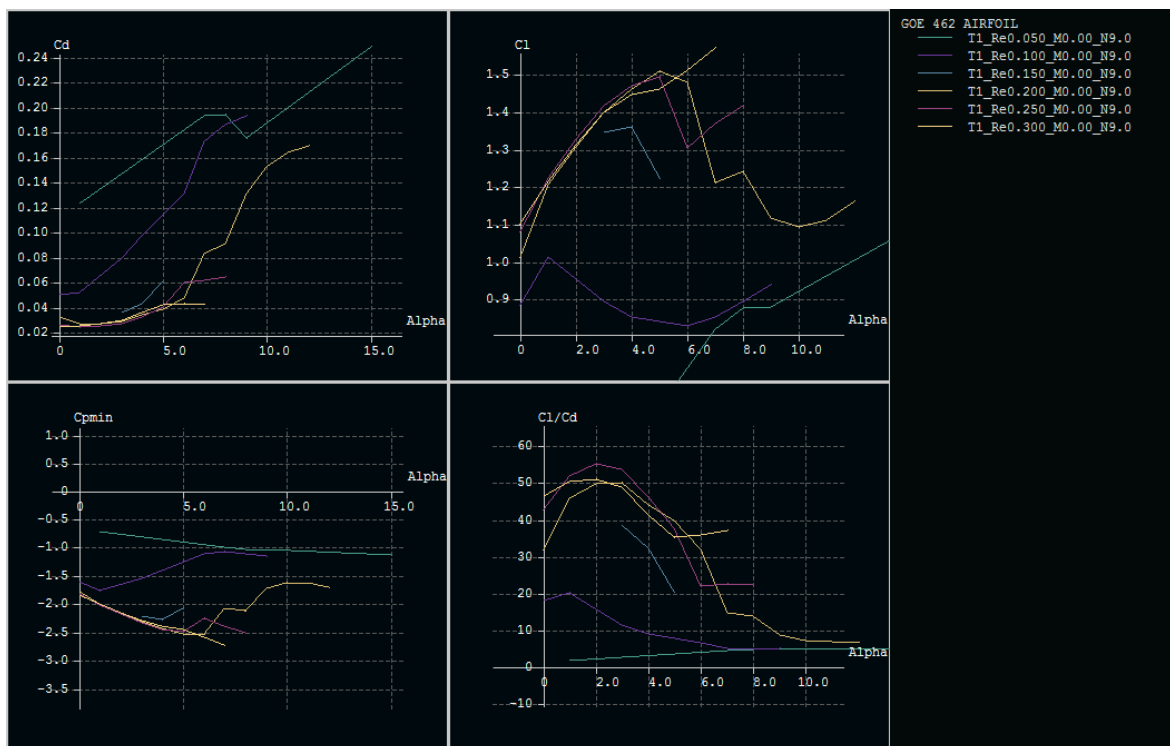


Gráfico 13.C: Simulación GOE 462