

# Estudio de las fuerzas de sustentación y arrastre en un perfil NACA en un túnel de viento subsónico no-normalizado.

Arsuaga, Diego

2023

---

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/5912>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

# Estudio de las fuerzas de sustentación y arrastre en un perfil NACA en un túnel de viento subsónico no-normalizado

Arsuaga Gómez Diego (noveno semestre en Ingeniería Automotriz)<sup>1,\*</sup>, Hoyos Falcó Luis (noveno semestre en Ingeniería Automotriz)<sup>1</sup>, Cantú Hernández Francisco (profesor responsable)<sup>1</sup>, Acevedo Escalante Manuel F. (profesor asesor)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México

## Resumen

La aerodinámica es una rama de la mecánica de fluidos, esencial en el desarrollo de nuevas tecnologías en la industria aeronáutica y automotriz, siendo imprescindible para la formación de cualquier ingeniero. Actualmente en el Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica (IDIT) de la IBERO Puebla se encuentra un túnel de viento, herramienta básica para el estudio de las fuerzas aerodinámicas sobre un objeto de prueba. Este proyecto presenta el desarrollo y análisis de un perfil alar NACA (Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica) diseñado para ser probado a un régimen subsónico, el cual cumple con el área frontal mínima para ser un objeto de estudio válido dentro del túnel de viento utilizado. Con la programación y calibración de dos celdas de carga fue posible analizar las fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre a las que se ve sometido el perfil NACA al hacer pasar viento alrededor suyo. Asimismo, se logró localizar las regiones de baja y alta velocidad generadas por la geometría del perfil alar. Este estudio abre la posibilidad de realizar prácticas académicas para alcanzar un mayor entendimiento de la mecánica de fluidos.

**Palabras clave:** Túnel de viento, perfil alar, sustentación, arrastre.

\***Autor Corresponsal:** 189551@iberopuebla.mx

## Introducción

La aerodinámica estudia las reacciones que tienen los fluidos que se mueven en torno a un medio sólido. Esto es importante, ya que, en el diseño de aviones, barcos, estructuras o incluso vestimentas deportivas, es necesario minimizar o maximizar el arrastre. Matemáticamente la aerodinámica se puede estudiar mediante la aplicación de las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho k - \nabla P + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad \dots (1),$$

donde  $\mathbf{u}$  representa el vector de la velocidad de flujo,  $P$  la presión,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $\rho$  la densidad del fluido y  $k$ , el campo de aceleraciones, [1]. Si bien, estas ecuaciones son capaces de describir el movimiento de un fluido, hasta el momento no se conoce ninguna solución analítica completa para ellas, por lo que, en estos estudios se suelen emplear simulaciones numéricas para resolverlas, mediante lo que se conoce como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Particularmente, en el campo experimental, se suelen emplear herramientas como el túnel de viento; éste es un dispositivo que permite estudiar el comportamiento del flujo de viento cuando interactúa con cuerpos sólidos. Estos estudios son cruciales, por ejemplo, en la aeronáutica, ya que permite mejorar el diseño de los aviones para minimizar el uso de combustible en las rutas, o en la industria automotriz, para el mismo objetivo.

Desde hace algunos años, el IDIT cuenta con un instrumento de este tipo, por lo que, el objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de las fuerzas de arrastre y de sustentación de un perfil NACA inmerso en un túnel de viento no-normalizado, con el empleo de celdas de carga.

El estudio del movimiento de fluidos en geometrías complejas ha sido uno de los retos más importantes de la mecánica de fluidos. Esto se debe a la dificultad de resolver las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de los fluidos en estas condiciones. Por esta razón, los mayores avances en este campo durante el siglo XX se basaron únicamente en observaciones experimentales, [2].

La ingeniería del viento, por su parte, ha desarrollado estudios sobre el movimiento del aire a partir del modelado físico de los procesos que ocurren en la capa límite. Este modelado se realiza en túneles de viento, que son instalaciones diseñadas para reproducir las condiciones de flujo reales.

Los túneles de viento son conductos donde se genera un flujo de aire uniforme mediante uno o varios ventiladores. La parte más importante del túnel es la cámara de ensayos, que debe ser transparente para permitir la observación y medición de las fuerzas que experimenta el modelo, y las condiciones del aire que lo rodea, [3].

Para generar una velocidad mayor cerca del modelo, la cámara de ensayos suele ser de menor área que el resto del túnel. Esto se debe a que, por conservación de caudal, el aire debe pasar más rápido por una sección más estrecha.

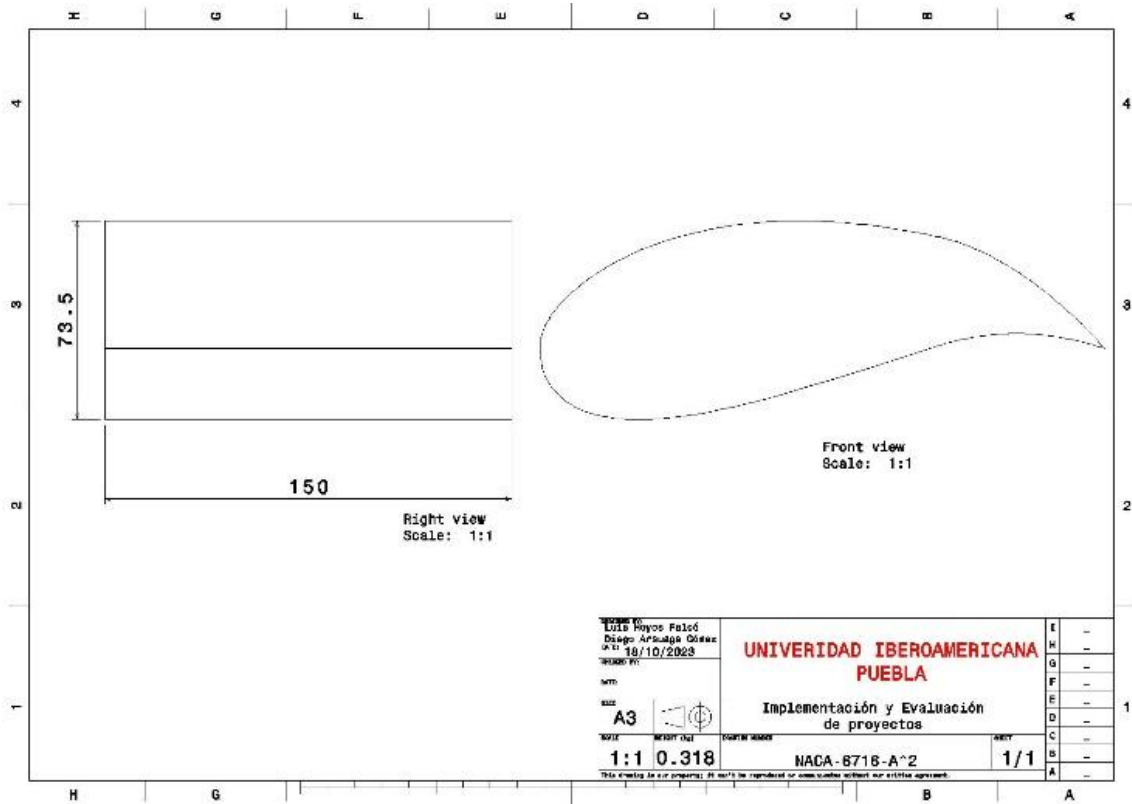


Fig. 1. Vista lateral y frontal del perfil alar NACA rediseñado con medidas del área frontal.

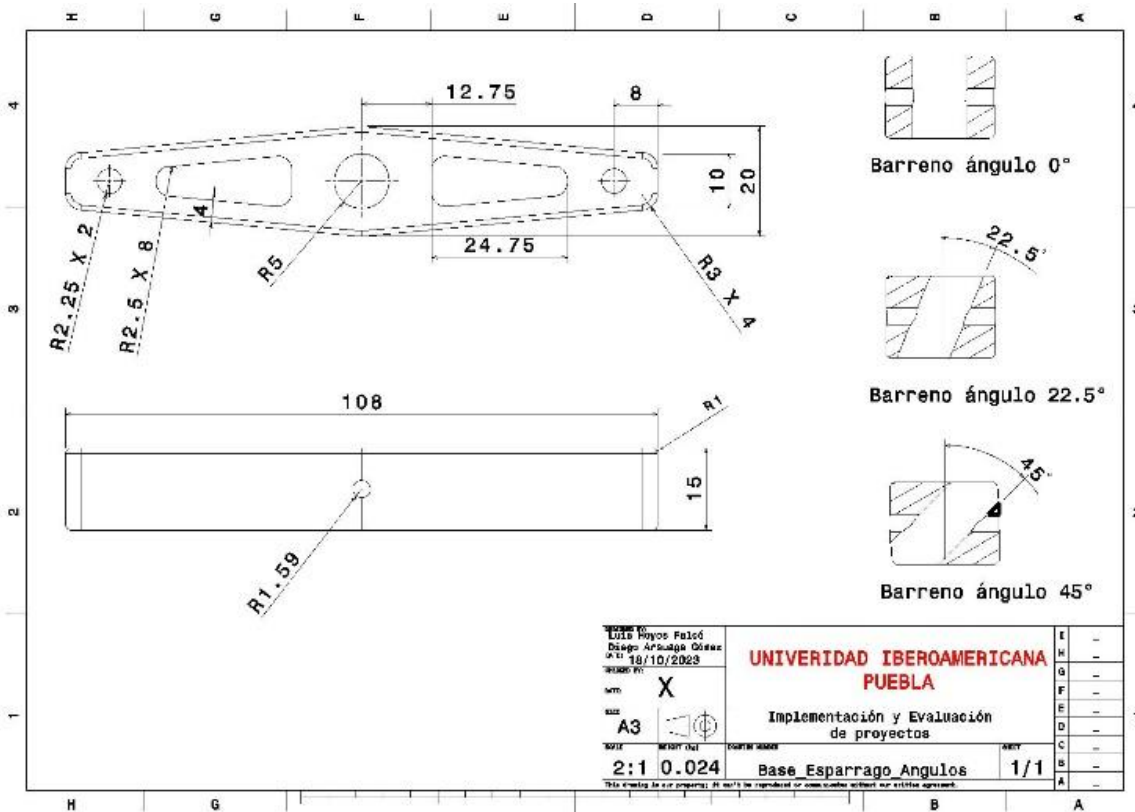


Fig. 2 Vista lateral y frontal de la base del perfil alar con la variación del ángulo en el barreno.

Esto permite ahorrar energía en el ventilador, ya que genera el mismo efecto, pero con una potencia menor, además de reducir las pérdidas por fricción en las paredes y codos del

túnel. Al final de la cámara de ensayos, hay un tramo llamado difusor que aumenta el área y disminuye la velocidad del aire.

Cualquier túnel de viento puede ser caracterizado como subsónico, solo si la velocidad otorgada es menor a 100m/s, ya que la compresión del aire a esas velocidades puede ser despreciada en cualquier estudio aerodinámico, [3].

Los perfiles alares nacen en 1866, cuando el ingeniero Francis Wenham patentó su diseño de alas superpuestas en una máquina voladora. Él y John Browing se consideran los diseñadores y constructores del primer túnel de viento. Con éste, demostraron experimentalmente que la relación entre las fuerzas de sustentación y arrastre en las alas largas y estrechas era mayor que en las cortas y gruesas, aunque tuvieran la misma área aerodinámica, [4].

En 1915 se crea el NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), que destacó la importancia de mejorar la eficiencia de los perfiles existentes. A partir de los años 30 dicho comité desarrolló una serie de perfiles: la familia NACA de 4, 5 y 6 dígitos. Todos ellos fueron clasificados en catálogos como el *Summary of Airfoil Data*, donde se categorizaron por geometría y características aerodinámicas. Se define como perfil aerodinámico a la forma del área transversal de un cuerpo que, al desplazarse a través de un fluido, es capaz de generar una distribución de presiones a su alrededor; de esta manera, se forman diferencias de presiones que derivan en fuerzas de sustentación y de arrastre, [4].

Para lograr el análisis matemático de este fenómeno, es necesario hacer uso de tecnología de cómputo numérico. Para estudiar el comportamiento de los fluidos, se usa la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que se utiliza para predecir su flujo, la transferencia de calor y otros fenómenos relacionados, como las reacciones químicas, la combustión y la aeroacústica, [5].

El CFD tiene su origen en la combinación de dos disciplinas: la mecánica de fluidos y el cálculo numérico. Las ecuaciones que describen el flujo de fluidos son de naturaleza matemática, y el cálculo numérico se utiliza para resolverlas. La principal ecuación es la de transporte de la variable de interés, representada por el símbolo  $\phi$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \phi dV + \oint \rho \phi V \cdot dA = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi + \int S_{\phi} dV \dots (2),$$

que se resuelve vía fluidodinámica computacional.

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en CFD poseen esta forma, con cuatro términos: el término de tiempo, el término advectivo, el término difusivo y el término fuente. Para representar diferentes ecuaciones de conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación: la variable  $\phi$ , el coeficiente de difusión  $\Gamma$  y la fuente  $S$ , [5].

Los métodos de discretización más utilizados en CFD son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo el de los volúmenes finitos, el más utilizado, ya que es relativamente sencillo de implementar y permite resolver problemas complejos.

Estos métodos dividen el dominio continuo del problema en un conjunto de subdominios discretos, llamados volúmenes de control. Las ecuaciones que describen el flujo de fluidos

se discretizan en cada volumen de control, y luego se resuelven de forma numérica.

## Metodología

### *Diseño y desarrollo del perfil alar NACA*

El perfil alar seleccionado fue basado en un perfil alar NACA 6716, que es de gran uso en alas de aviones comerciales, ya que ofrece un buen equilibrio entre sustentación y arrastre, [6]. Para poder utilizar este perfil se adaptaron sus dimensiones, como se muestra en la Fig. (1), para que su estudio en el túnel de viento pudiera arrojar resultados coherentes. Según sus constructores, para que un objeto pueda ser probado en este túnel de viento en específico, el área frontal debe cumplir con  $0.011m^2 \leq A \leq 0.014m^2$ , [7]. Una vez obtenida el área frontal de trabajo se rediseñó, con la ayuda del software de diseño CAD Catia V5, el perfil NACA 6716 para que cumpliera con ese requisito. Para lograr que el perfil aerodinámico fuera sometido a un flujo de aire a distintos ángulos de ataque, se diseñaron 3 bases. A ellas se acopló un eje, llamado espárrago, para transmitir las fuerzas de arrastre y sustentación deseadas, y éste se conectó a las celdas de carga destinadas a obtener los datos. Los ángulos de las bases en el barreno donde estaba acoplado el espárrago fueron  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , como se muestra en la Fig. (2). El perfil aerodinámico fue adaptado para que las bases se pudieran colocar en su parte inferior sin afectar el flujo de aire.

Posteriormente se utilizó un proceso de manufacturado rápido (impresión 3D) con un filamento de PLA para obtener las piezas físicas.

### *Diseño de báscula para celdas de carga*

Para obtener resultados de las fuerzas aerodinámicas que se presentaron en el perfil, fue necesario diseñar otra serie de bases para las celdas de carga que fueron utilizadas para tomar datos. En las Figs. (6) y (7) se pueden identificar ambas celdas de carga colocadas de manera perpendicular. La celda que se encuentra de manera horizontal es la que censó la fuerza de sustentación que el perfil aerodinámico generó; la vertical fue la encargada de registrar la fuerza de arrastre provocada.

Cabe recalcar que para obtener datos más precisos es necesario que el área central, donde se presenta un orificio con forma de dos círculos, debe de estar libre y sin ningún tipo de apoyo estructural adicional que genere rigidez, ya que ésta área es la que debe deformarse para obtener los datos correctamente.

Al ensamble de todos los componentes se le otorgó el nombre de “báscula”. Para ensamblar los componentes de manera que se pudieran medir las dos fuerzas aerodinámicas generadas en el perfil, fue necesario diseñar tres modelos CAD con ayuda del software SolidWorks. La primera pieza Fig. (3) es la encargada de sujetar la celda de carga asignada a la sustentación; la pieza cuenta con un barreno del cual se sujeta la celda a una solera de acero, que, aparte de funcionar como base, también funge como contrapeso para obtener un punto fijo y así, la carga que se llegue a presentar en el otro extremo genere una deformación medible.

La segunda pieza Fig. (4) tiene como función, unir ambas celdas de carga para poder utilizarlas al mismo tiempo. Esta pieza también cuenta con un barreno donde se fija la celda de arrastre y obtener una deformación en el momento en el que una fuerza horizontal se presente en el extremo opuesto al que se sujeta, generando un efecto palanca.

La última pieza diseñada Fig. (5) para la báscula se posiciona en la parte superior de la celda de carga, que mide el arrastre. En esta pieza encontramos un barreno en la cara superior con el fin de acoplar el espárrago, el cual se conecta a las bases diseñadas para variar el ángulo de ataque del perfil alar

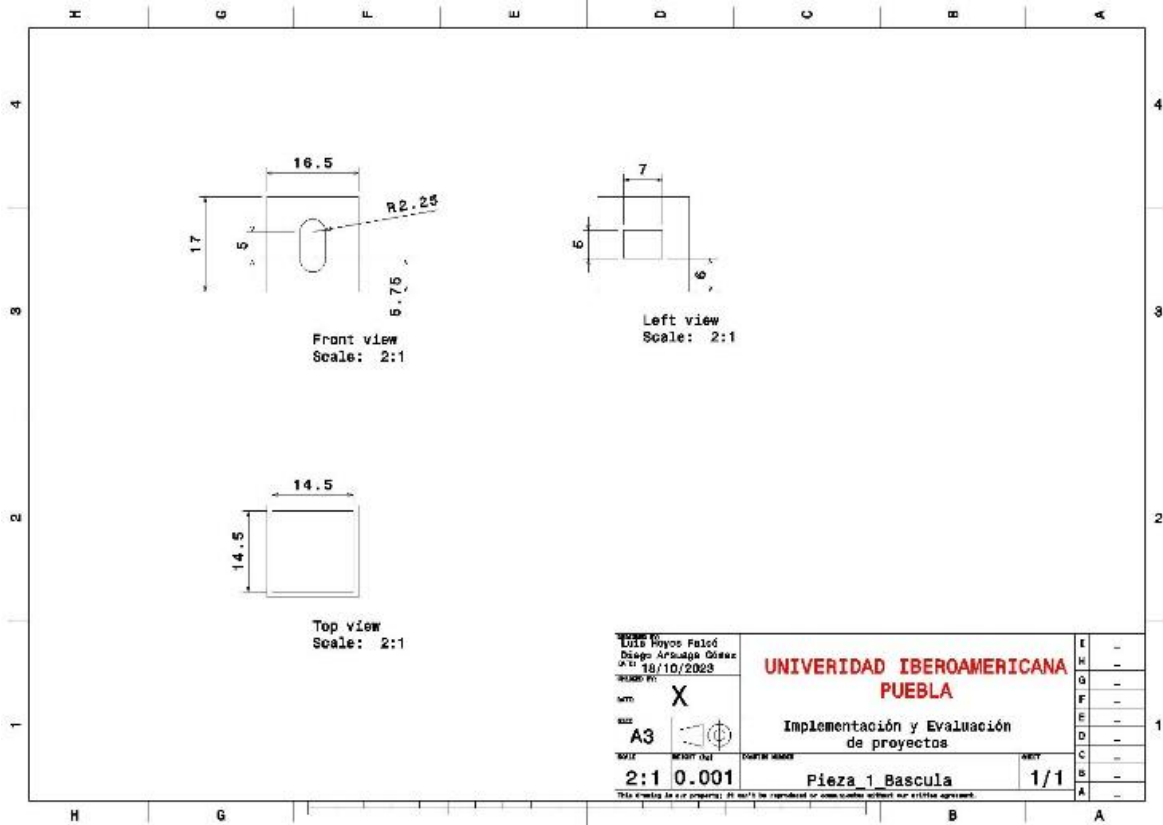


Fig. 3 Pieza 1 de la báscula.

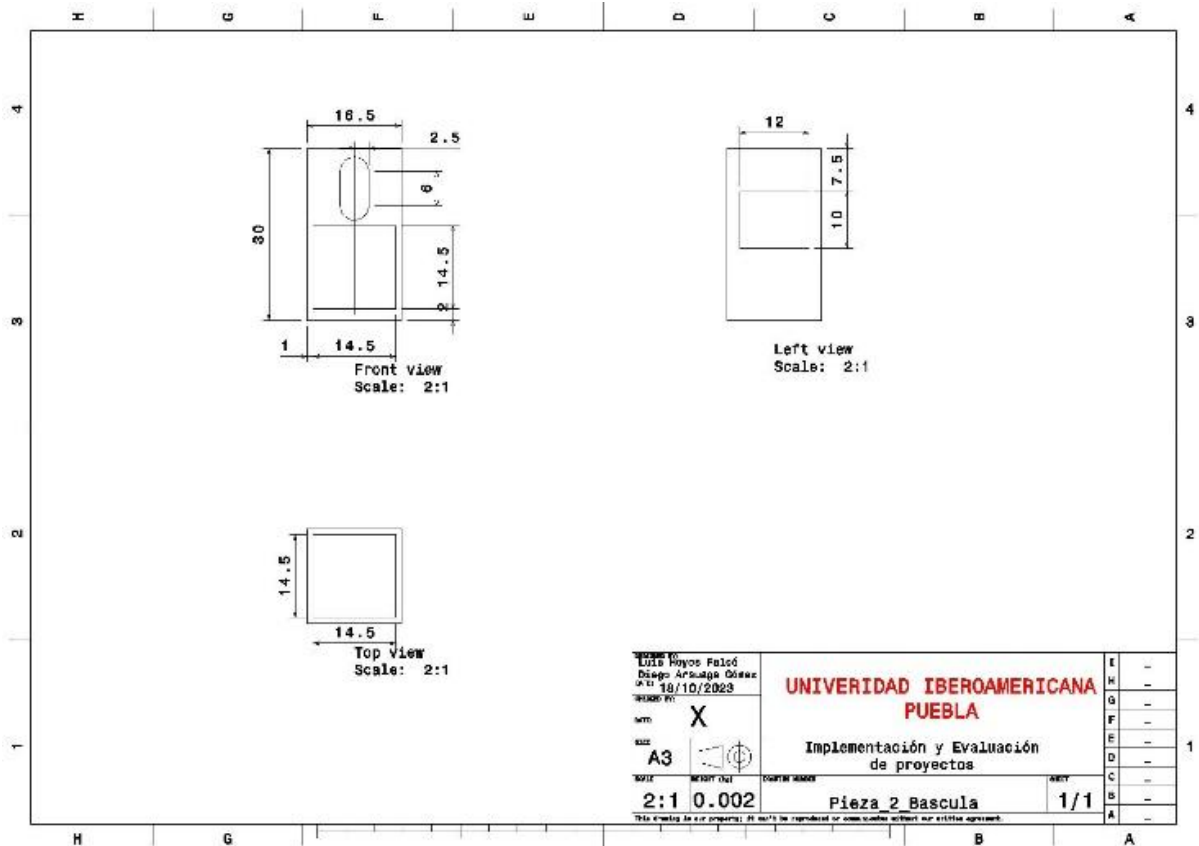


Fig. 4 Pieza 2 de la báscula.

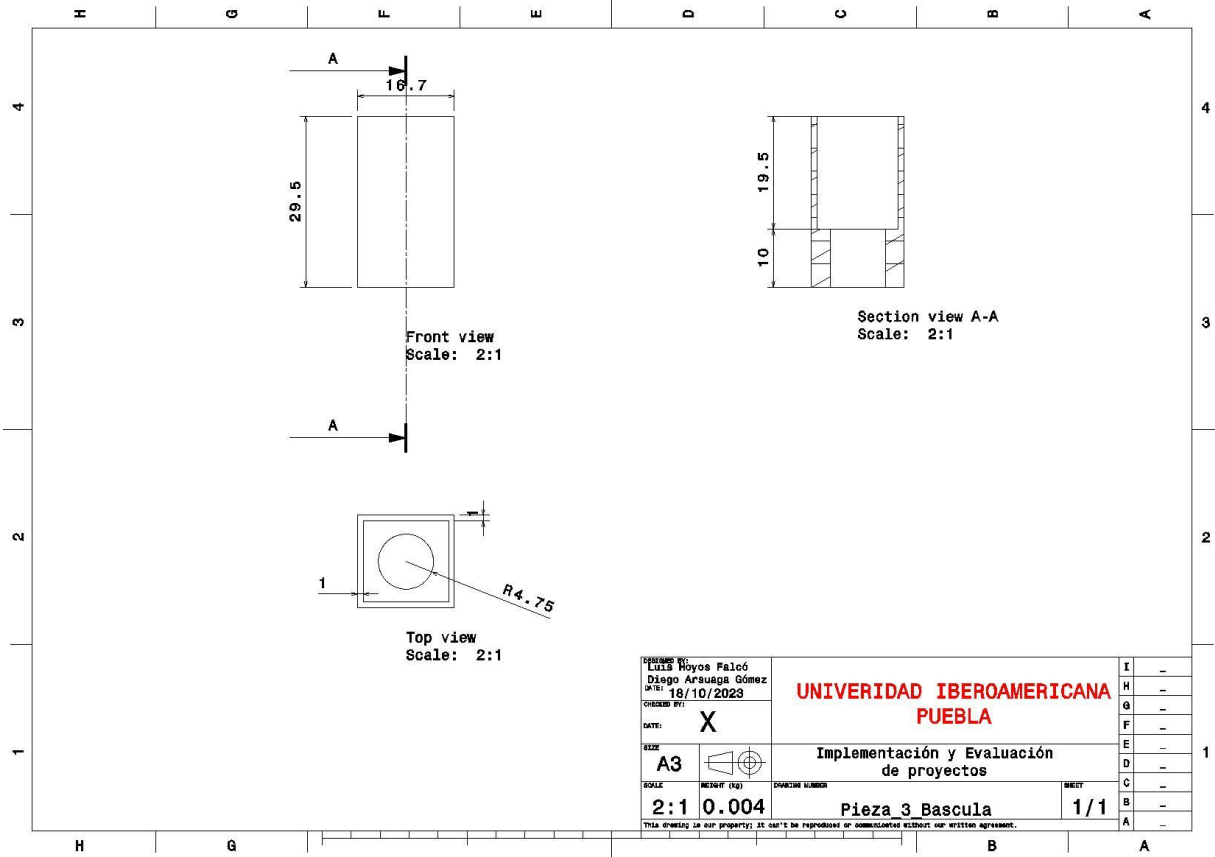


Fig. 5 Pieza 3 de la báscula.

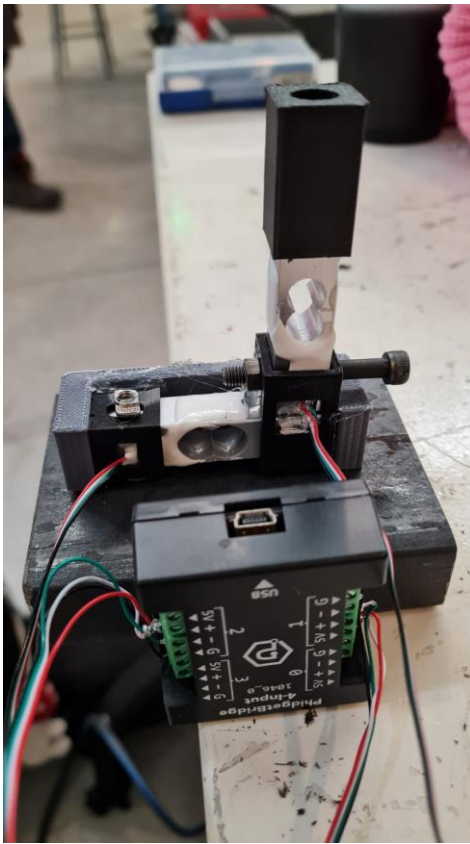


Fig. 6 Báscula ensamblada.



Fig. 7 Ensamble CAD de báscula con espárrago y celdas de carga.

#### Calibración y programación de celdas de carga

Las celdas de carga que se utilizaron fueron dos *Single Point Load Cell*, una de 5 kg para la sustentación y una de 20 kg para el arrastre. La calibración de la celda de carga tipo *Single Point* fue un procedimiento crucial para asegurar la precisión de las mediciones de fuerza, así como transformar el valor de mV (micro volts) que otorga la celda de carga, a gramos. Esto inició con la configuración de la celda para que registrara un valor cero cuando no había carga aplicada, conocido como calibración de "tara". Posteriormente, se sometió la celda a cargas conocidas, esto para relacionar cierto voltaje, con una masa específica, ajustando la ganancia, o sensibilidad, para que las lecturas coincidieran con los valores esperados. Este ajuste se realizó en varios puntos a lo largo del rango de operación para garantizar la precisión en diversas condiciones.

Se verificó la lectura en cero después de la calibración para confirmar la precisión en diferentes niveles de carga. Además, se documentaron detalladamente los ajustes realizados, incluyendo las lecturas de cero y los ajustes de ganancia. Esta documentación proporciona un historial útil para el mantenimiento y la trazabilidad de las mediciones, además fue necesario realizar revisiones periódicas, ya que las condiciones operativas podían cambiar con el tiempo y entorno de trabajo.

#### Túnel de viento

El túnel de viento que se encuentra dentro del IDIT Puebla es de tipo circuito abierto con una sección de prueba. La sección de prueba es de 1 m de largo y tiene un área circular de 0.45 m de diámetro, además está equipado con un ventilador de 5 HP que genera un flujo de aire a una velocidad máxima de 7 m/s que está conectado a un variador de frecuencia (Vacon 20), el cual controla la dirección y velocidad de ventilador [7].

Debido a la falta de mantenimiento e información del túnel de viento, mostrado en la Fig. (8), fue imposible utilizar los controles eléctricos anteriormente habilitados. Por lo que, para su uso, fue necesario alterar las variables de revoluciones por minuto (RPM) y frecuencia (Hz), encargadas de controlar el ventilador directamente desde el variador de frecuencia. Una vez comprendido el funcionamiento del variador fue posible conseguir un flujo de viento constante con una velocidad promedio de 9.7 m/s, superior a la registrada por [7].



Fig. 8 Túnel de viento en el IDIT IBERO Puebla

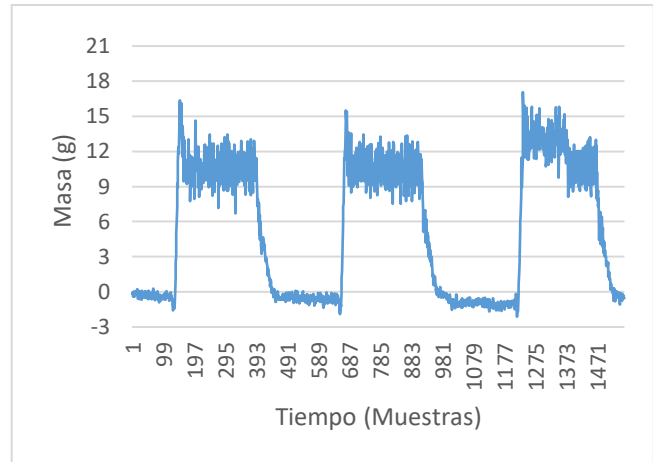
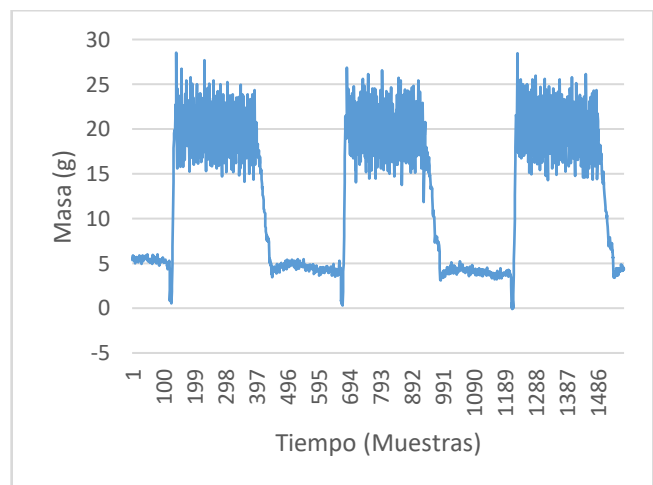
El túnel de viento cuenta con la implementación de una máquina de humo, la cual aportó un apoyo visual para resaltar las zonas de alta y baja presión y velocidad que se pueden generar en el perfil alar.

#### Simulación CFD

Para comprobar que la evaluación física realizada fuera correcta, se decidió crear una simulación con ayuda del software Siemens NX. En el programa se recrearon las condiciones físicas del túnel de viento (área de prueba, velocidad del viento y temperatura), así mismo se ocupó el mismo archivo CAD del perfil alar que se imprimió, esto con el objetivo de recrear de manera más exacta el comportamiento del perfil.

#### Resultados y Discusión

Durante el proceso de experimentación y análisis de este proyecto, siguiendo la metodología explicada previamente, se obtuvieron 6 distintos gráficos, utilizados para observar cómo se comporta el perfil alar cuando se hace pasar un viento de 9.7 m/s sobre él, con las 3 distintas bases fabricadas para variar el ángulo de ataque entre  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ . En la Fig. (9) se observa el comportamiento de la celda de carga de arrastre cuando se activa y desactiva el túnel de viento, se puede identificar que se crea un pico al momento de activar el ventilador, para posteriormente estabilizarse en un rango entre 9 y 15 gramos de arrastre, llegando a un máximo de 17.06 gramos con el ángulo de ataque de  $0^\circ$  mostrado en la Fig. (10).

Fig. 9 Gráfica de arrastre con ángulo de ataque  $0^\circ$ Fig. 10 Perfil alar con ángulo de ataque de  $0^\circ$ .Fig. 11 Gráfica de arrastre con ángulo de ataque  $22.5^\circ$ 

Al realizar el cambio de base, a la que otorga un ángulo de  $22.5^\circ$ , como en la Fig. (15), se puede observar un aumento de un 67% (11.47 gramos más) en el valor máximo obtenido, comprobando que, a mayor área frontal expuesta del perfil alar, mayor será el arrastre, mostrado en la Fig. (11).



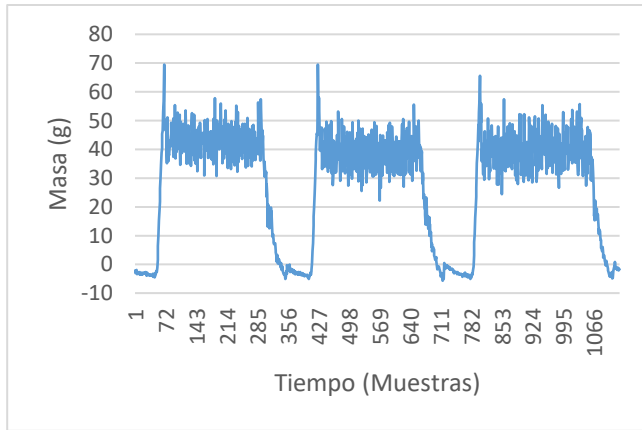


Fig. 12 Gráfica de arrastre con ángulo de ataque de 45°

Para la Fig. (12) se instaló en el perfil la base con ángulo de ataque de 45°, con la que se pudo obtener un arrastre máximo de 69.46 gramos, siendo ésta, la base que mayor área frontal proporciona, lo cual provoca que se ejerza una mayor resistencia al flujo del fluido sobre el perfil.

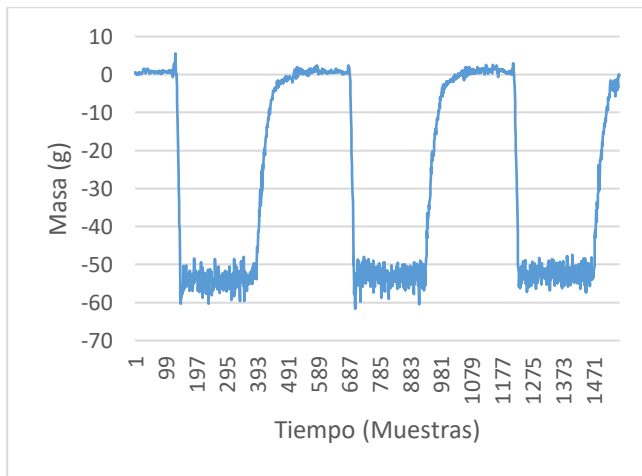


Fig. 13 Gráfica de sustentación con ángulo de ataque 0°

En cuanto a la sustentación, en la Fig. (13), se puede observar que al momento en el que fluye el flujo sobre el perfil aerodinámico, resulta en una masa negativa (tomar en cuenta que el estado de reposo o apagado, es en 0 gramos) esto es un indicativo muy claro de una correcta sustentación para la aplicación que se propuso para este proyecto. Esta pérdida máxima de 61.65 gramos se puede interpretar como la creación de una zona de baja presión en la parte superior del perfil y una zona de alta presión en la parte inferior del mismo, logrando que haya cierta elevación por la fuerza que se ejerce hacia arriba.

Al instalar la base de 22.5° y medir la sustentación, en la gráfica Fig. (14) se plasma un incremento importante en la pérdida de masa del perfil alar, en esta ocasión llegó a provocar hasta 115.73 gramos de pérdida, un aumento del 87.72% con respecto a la prueba anterior.

Por último, se tienen los datos recabados al experimentar con la base de 45°, resaltando la Fig. (17), éste pudo obtener la mayor pérdida de peso (178.99 gramos), o sea, un 40.04% de la masa total del objeto de experimentación (447 gramos);

así como [8] establece, es importante destacar que cada perfil tiene un punto llamado *Stall*, el cual hace referencia al punto en donde el ángulo de ataque es demasiado grande, la sustentación cae a 0 y al mismo tiempo, el arrastre se vuelve muy grande, por lo que no se puede establecer que siempre que se incremente el ángulo de ataque del objeto, la sustentación seguirá incrementando linealmente como se reporta en este proyecto.

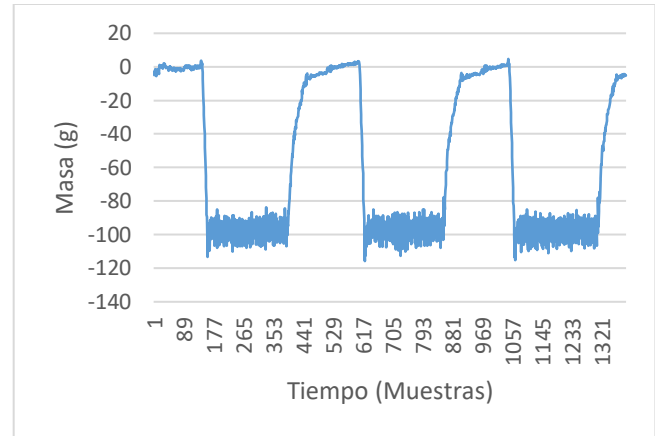


Fig. 14 Gráfica de sustentación con ángulo de ataque de 22.5°



Fig. 15 Perfil alar con ángulo de ataque de 22.5°.

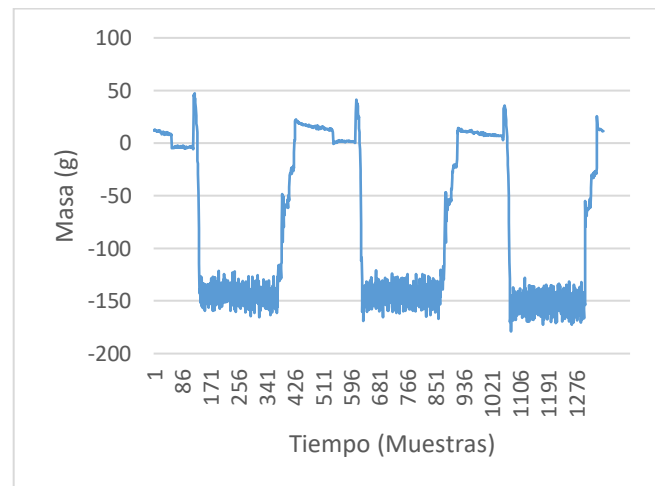


Fig. 16 Gráfica de sustentación con ángulo de ataque 45°



Fig. 17 Perfil alar con ángulo de ataque de 45°.

La simulación CFD asemeja mucho las reacciones que se presentaron en el perfil alar al ser estudiado en el túnel de viento. De esta simulación recabamos los resultados de la velocidad del viento y la presión al rededor del perfil aerodinámico.

En la Fig. (18) se puede observar cómo es que la velocidad se comporta al rededor del perfil. En la zona superior, se observa una región que resalta de color rojo, esta es la zona donde se presenta la mayor velocidad del flujo en el perfil y del lado izquierdo se observa una barra de colores la cual indica la velocidad por región del perfil alar.

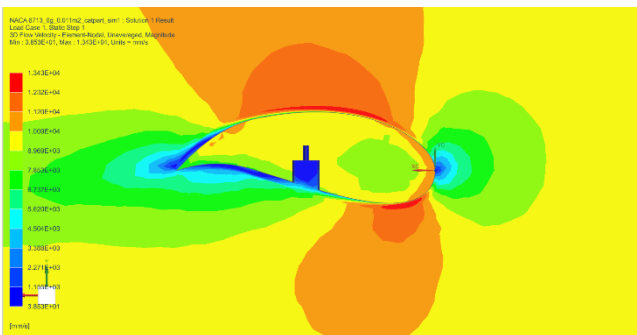


Fig. 18 Resultados CFD velocidad del flujo.

En la Fig. (19) se observan las regiones de alta y baja presión que se generan por la geometría del perfil alar. Como se esperaba, se genera una zona de alta presión en la parte inferior y una de baja presión en la parte superior del perfil, esto generando la sustentación observada en las Figs. (13),(14) y (16). La zona roja generada en el punto de primer contacto del perfil alar (donde el flujo colisiona con el perfil en la zona más frontal), es la presión que ocasiona la fuerza de arrastre que se estudió en las Figs. (9),(11) y (12).

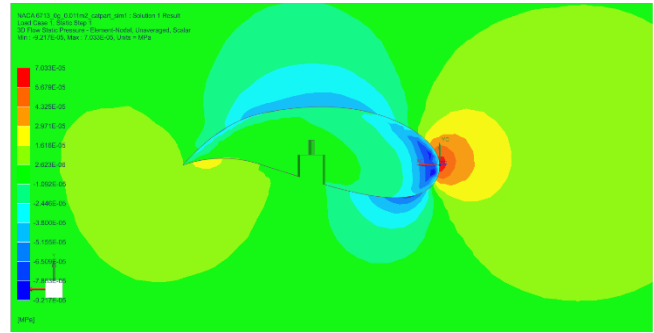


Fig. 19 Resultados CFD presión del flujo.

Es interesante destacar la relación que tienen ambos resultados de velocidad y presión, ya que las zonas donde la variable se encuentra mayormente concentrada, son opuestas; dando a entender que, entre más rápido fluya el viento, menor presión se generara en esa zona e inversamente.

La simulación arrojó un coeficiente de sustentación de 0.0141019 y un coeficiente de arrastre de 0.362548. Según [9] un coeficiente de sustentación menor a 1 es indicio de que la fuerza no es suficiente para levantar el cuerpo, por lo que queda claro que la velocidad del viento es demasiado pequeña para causar que el perfil pueda sustentar su propio peso.

Al realizar las pruebas visuales con ayuda de la máquina de humo se puede observar en la Fig. (20) la formación de áreas de alta y baja presión al rededor del perfil. La acumulación de humo en la parte inferior del perfil es prueba de la alta presión que se genera en comparación con la parte superior donde la velocidad es mayor.

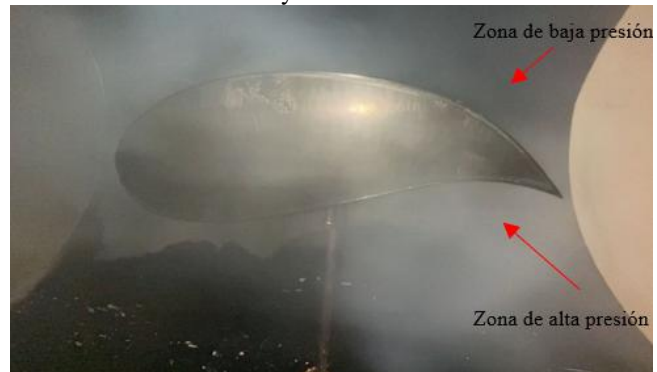


Fig. 20 Localización de zonas de alta y baja presión en el perfil alar con ángulo de ataque 0° con el apoyo de la máquina de humo.

Para el apartado del estudio cualitativo visual del comportamiento del fluido sobre el perfil, se obtuvo una comprensión real al hacer fluir humo junto con el viento, esto dio como resultado una delimitación clara de la capa límite, en donde el fluido presenta un flujo turbulento en la parte posterior a esta, como se puede ver en la Fig. (21).



Fig. 21 Localización del desprendimiento de capa límite en el perfil alar con ángulo de ataque a  $45^\circ$

Además de esto, se puede corroborar la teoría de la creación de zonas de alta y baja presión observables en las Figs. (20) y (21), representadas por mayor y menor velocidad respectivamente, causantes del fenómeno de sustentación, respaldando el análisis que se realizó con ayuda de las celdas de carga, donde se pudo observar una pérdida de peso considerable en cada prueba con ángulos de ataque distintos. Dados estos resultados, es posible determinar que, el perfil NACA 6716 no tiene las especificaciones necesarias para, como mínimo, sustentar su propio peso dadas las condiciones elegidas, esto quiere decir, con ángulos de ataque de  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  y  $45^\circ$ , ni con el régimen de velocidad determinado por el túnel de viento de  $9.7$  m/s, por lo que, para lograr eliminar su propio peso, sería necesario encontrar el ángulo de ataque adecuado o bien, incrementar la velocidad del flujo para causar una zona de alta presión

## Referencias

1. P. Constantin. *Navier-Stokes Equations*. University of Chicago Press, 2020 [en línea] Disponible en: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=C5RfEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=navier+stokes&ots=K\\_ne\\_Z8-X60&sig=X0Kz13gToxE39OnPAb\\_4bKzXCEs#v=onepage&q=navier%20stokes&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=C5RfEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=navier+stokes&ots=K_ne_Z8-X60&sig=X0Kz13gToxE39OnPAb_4bKzXCEs#v=onepage&q=navier%20stokes&f=false).
2. B. López. *Desarrollo de un Túnel de Viento Numérico*. 2018 [en línea] Disponible en: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/22557>
3. E. García. *El túnel de viento, Universidad de Sevilla*. 2015 [en línea] Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4030/fichero/Elena+Garc%C3%ADa+Ram%C3%ADrez%252F3.-+CAP%C3%8DTULO+1.pdf>
4. O. López. *Estudio aerodinámico de un perfil naca, memoria y anexos*. 2021 [en línea] Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357232/TFG\\_ORIOL\\_LOPEZ\\_MEMORIA\\_QP2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357232/TFG_ORIOL_LOPEZ_MEMORIA_QP2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
5. Esss. *Dinámica de Fluidos Computacional o CFD: entienda que es ESSS*. 2020.[en línea] Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es>
6. S. Pinzón. *Vista de El perfil alar y su nomenclatura NACA | Ciencia y Poder Aéreo*. 2023[en línea] Disponible en: <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaaereo/article/view/4/106>
7. J. A. Sánchez, *Instrumentación de un túnel de viento subsónico. Benemérita universidad autónoma de Puebla*. 2015 [en línea] Disponible en: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/60ec9236-bf4b-477f-b0e8-8662efae694b>
8. Universitaria de Investigación y Desarrollo. *MANUAL AERODINAMICA*. SF. [en línea] Disponible en: <https://www.udi.edu.co/images/biblioteca/aeronautica/aerodinamica.pdf>
9. Universidad distrital Francisco José de Caldas. *Metodología para el cálculo de coeficientes de sustentación y arrastre en perfiles aerodinámicos simétricos aplicado a turbinas Darrieus* 2023. [en línea] Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/12502/13536>

inferior mucho mayor, que provocara una masa de  $-447$  gramos como mínimo.

## Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

De acuerdo con los resultados reportados durante las etapas de elaboración y experimentación de este proyecto se concluye que las pruebas realizadas cuentan con los parámetros necesarios para recolección de datos coherentes, por lo que, aunque el proyecto no podrá ser escalado para futuros objetos experimentales, servirá de base para cualquier estudio aerodinámico que se desee.

Se pudieron obtener las fuerzas de sustentación y arrastre dentro del túnel de viento subsónico, así como el estudio visual del flujo a través del perfil alar en cada una de sus 3 posiciones diferentes y el análisis CFD, corroborando los datos matemáticos con los experimentales, identificando que, ciertamente, después de obtener los coeficientes de sustentación y arrastre, no sería posible lograr una sustentación total del perfil seleccionado.

En cuanto a recomendaciones para trabajos posteriores, será necesario contar con un panel de control funcional, ya que éste no funciona actualmente. Además, se recomienda rediseñar la base de las celdas de carga para lograr una mayor estabilidad y confiabilidad al momento de realizar mediciones, ya que las vibraciones del propio túnel de viento, al estar encendido, afectan significativamente los resultados obtenidos. Por último, será necesario caracterizar completamente el túnel de viento para lograr que cualquier experimento realizado pueda ser escalado.