

ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL TRAJE AÉREO DENTRO DE UN TÚNEL DE AGUA

Carlos Eduardo Banegas Flores^{1,*}; Fernando José De La Cruz Chávez¹,

¹Departamento de Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica de la NCKU 國立成功大學

Recibido: 05/octubre/2020

Aceptado: 11/noviembre/2020

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v13i1.11761>

RESUMEN

En este estudio se usan dos tipos de trajes aéreos (GUS y AURA) utilizando un túnel de agua implementando técnicas de visualización del flujo. Distintas características aerodinámicas alrededor y sobre la superficie de distintos modelos con cambios en el diseño son discutidos. Los objetivos del estudio incluyen la determinación de cual parte del traje aéreo induce más sustentación, alterando el diseño original de ambos trajes aéreos usando las técnicas de visualización de túnel de agua, el método de flujo de tinta (Ink Flow Method) y el método de puntos rojos (Red Dot Method). Se determina como diferentes diseños de trajes aéreos afectan el rendimiento aerodinámico y la estabilidad de vuelo del traje aéreo. Se obtienen instantáneamente vectores de magnitud y propiedades relacionadas del flujo implementando un método óptico de visualización de flujo llamado Velocimetría de imágenes de partículas (PIV).

Palabras clave: Túnel de agua, traje aéreo, flujo, Aerodinámica.

ABSTRACT

In this study two types of wingsuits are used (GUS and AURA) using a water tunnel implementing fluid flow visualization techniques. Different aerodynamic characteristics around and on the surface of different models with design changes are discussed. The objectives of the study includes determining which part of the wingsuit induces more lift, by altering the original design of both wingsuits using Ink Flow Method and Red Dot Method water tunnel visualization techniques. It is determined how different wingsuit designs affect the aerodynamic performance and flight stability of the wingsuit. Velocity profiles and related properties of fluid flow are obtained instantly by implementing an optical flow visualization method called Particle Image Velocimetry (PIV).

Keywords: Water tunnel, wingsuit, fluid flow, aerodynamics.

*carloseduardobanegasflores@gmail.com

1 Introducción

La última faceta y el siguiente paso en la tecnología del paracaidismo es el vuelo con traje aéreo. El vuelo con el traje aéreo le da al participante la estimulante sensación de vuelo como un pájaro, donde el piloto puede controlar su trayectoria a través del cielo, como un avión, cambiando físicamente la posición y la forma del cuerpo. El vuelo con traje aéreo es un deporte extremo, una forma particular de paracaidismo, en el que paracaidistas expertos y saltadores BASE usan un traje especial que les permite volar después de saltar desde una gran altitud. Este traje especial llamado en inglés "Wingsuit" está diseñado para expandir la superficie del cuerpo creando alas bajo los brazos y las piernas del piloto para crear más sustentación, haciendo posible el planeo por el aire al recorrer mayores distancias horizontalmente. A diferencia del paracaidismo normal, en el que la caída es casi vertical a aproximadamente 45 m/s a 70 m/s, en el deporte de vuelo con traje aéreo los pilotos generalmente alcanzan velocidades de descenso vertical (hacia abajo) de 13 a 29 m/s y horizontal (hacia adelante) de 20 a 70 m/s. Con los diseños actuales de los trajes aéreo no es posible aterrizar usando sólo el traje aéreo en sí, sino que el piloto de traje aéreo despliega un paracaídas a una altura segura para descender al suelo.

Ya sea que el piloto salte desde un avión o desde un B.A.S.E. (Building, Antenna, Span and Earth), al usar un traje aéreo puede saltar en un planeo constante que generalmente alcanza proporciones de planeo de más de 2:1, dependiendo del diseño del traje aéreo, que termina cuando el piloto abre el paracaídas. La proporcionalidad de planeo es la relación entre la fuerza de sustentación y la fuerza de resistencia, que es uno de los parámetros más importantes que se tienen en cuenta para el diseño de un traje aéreo y normalmente se prefiere una proporcionalidad alta para alcanzar un vuelo de largo alcance.

1.1 Importancia del estudio

Actualmente hay varios grupos que trabajan en la mejora del rendimiento de los trajes aéreos a medida que la mentalidad general del deporte se basa en la prueba y el error a la aplicación de la tecnología y los principios científicos (Bisharat, 2015). Hemos descubierto que hay pocos estudios y documentación científica sobre la aerodinámica, el control y el diseño de los trajes aéreos.

Sin embargo, la información científica sobre este deporte está aumentando gradualmente y muestra su potencial más allá de la búsqueda de emociones y capta el interés de una variedad de expertos académicos. Una examinación de los factores que intervienen en el diseño actual de los trajes aéreos es crucial para decidir la dirección del desarrollo futuro. Los diseños actuales de trajes aéreos rara vez pueden volar más de 2 o 3 minutos cuando se lanzan desde altitudes normales de paracaidismo. Creemos que aumentar la proporcionalidad de planeo del traje aéreo permitirá que el traje aéreo se utilice para aplicaciones no deportivas, como el desarrollo para aplicaciones militares.

Los parámetros de diseño de las alas están limitados, en el caso de los trajes aéreos, por las dimensiones del cuerpo humano y las cuestiones de fuerza. La estructura humana y la fuerza muscular son el equivalente a los largueros, las costillas de las alas y las estructuras de una aeronave convencional: esto impone más restricciones al diseño de los trajes aéreos, ya que la fuerza del humano medio no puede cambiarse fácilmente (Engin y Kaleps, 1980; Robson y D'Andrea, 2010).

Los diseños actuales utilizan ciertas posiciones del cuerpo que requieren mucha menos fuerza muscular para sostenerse que otras posiciones. Permitir que las alas de los brazos se doblen hacia arriba con la fuerza de sustentación reduce la presión, pero da como resultado una mayor velocidad de descenso y una menor proporcionalidad de planeo. Los diseños de alas ideales crearían el centro de presión de

sustentación tan cerca de la línea central del cuerpo como sea posible, manteniendo al mismo tiempo una proporcionalidad de planeo deseable y sin requerir fuerza humana excesiva. Mover el centro de presión del ala hacia adentro reduciría los requerimientos de fuerza de los brazos y piernas humanas en el vuelo con traje aéreo.

El deterioro de la posición del cuerpo debido a la fatiga disminuye la comodidad del piloto. Un medio para reducir la carga sobre los hombros sin comprometer la intimidad de la experiencia de vuelo sería de gran beneficio tanto para el vuelo con traje aéreo (Robson y D'Andrea, 2010).

Incluso al planear, sabemos por experiencia práctica que mantener una velocidad constante es difícil y requiere práctica. Una posible explicación es la dificultad que tiene el piloto para calibrar el estado del sistema. Los objetos fijos están demasiado lejos para ser útiles como referencias visuales, por lo tanto, los únicos sentidos en los que se puede confiar son las fuerzas y aceleración y, en menor medida, el sonido de la corriente de aire. La capacidad de control es limitada debido a la escasa información de estado de la que disponen. El traje aéreo es ineficiente en el vuelo lateral. Los giros agresivos o las maniobras de tipo tonel (rotación alrededor del eje longitudinal), provocan una pérdida de altitud inmediata y considerable, lo que en la práctica significa que el vuelo con el traje aéreo suele ser bastante conservador, y el vuelo lateral suele limitarse a giros ejecutados lentamente.

2 Metodología

El estudio del túnel de agua fue seleccionado como el método apropiado para la visualización del flujo del traje aéreo. La capacidad de registrar fenómenos en números de Reynolds similares a aquellos en los que operan normalmente los trajes aéreos, es importante porque los factores que intervienen en el trabajo con modelos tridimensionales de trajes aéreos serían difíciles de escalar. El control de la velocidad del flujo de agua, el ángulo de ataque, y los diferentes diseños de brazos y piernas fueron otras consideraciones primarias del estudio del túnel de agua.

La selección del rango del ángulo de ataque de 5 a 25 grados refleja los ángulos medios de los trajes aéreos durante el vuelo constante. El ángulo de ataque negativo, que representaría el vuelo invertido, no fue considerado en este estudio. Aunque los trajes aéreos se vuelan actualmente invertidos, no se vuelan invertidos para un máximo rendimiento; de hecho, el rendimiento se degrada significativamente mientras se vuela invertido. Para la selección del diseño del traje aéreo, hemos elegido los trajes aéreos para principiantes y para avanzados. El traje aéreo para principiantes está diseñado para que el piloto pueda controlar y desplegar el paracaídas fácilmente. El traje aéreo avanzado es para pilotos experimentados y para volar a mayores velocidades. Luego cambiamos las alas de los brazos y las piernas de cada modelo, para visualizar y analizar el flujo.

2.1 Diseños de experimentos y procedimientos.

La metodología que hemos elegido para este experimento es la siguiente:

- Selección de modelos de trajes aéreos de diseño apropiado para principiantes y avanzados.
- Usando el software de diseño asistido por ordenador Catia, modelar los modelos de trajes aéreos.
- Teniendo las especificaciones del túnel de agua, calcular la relación de aspecto (AR) y la relación de bloqueo de los modelos.

- Crear u obtener un soporte que encaje en el túnel de agua para sostener los modelos.
- Modificar cada modelo de traje aéreo. Cambiar la estructura de los brazos y las piernas de los modelos principiantes y avanzados. Cada traje aéreo es modelado como un nuevo diseño. Esto da como resultado cinco modelos de trajes aéreos para principiantes y cinco modelos de trajes aéreos para avanzados. Dibujar una base especial en cada modelo que encaje en el soporte.
- Imprimir tridimensionalmente, todos los modelos de trajes aéreos en el tamaño apropiado dependiendo del área de la sección transversal del túnel de agua.
- Las pruebas en el túnel de agua comienzan con el método de flujo de tinta roja y el método de puntos rojos, a fin de obtener resultados que describan el flujo que rodea al modelo y en la superficie del mismo, respectivamente.
- Elegir los dos modelos más eficientes aerodinámicamente, uno para principiantes y otro para avanzados.
- Iniciar la prueba de Velocimetría de Imagen de Partículas (PIV). Preparar los láseres de iones y la cámara de alta velocidad. Obtener datos de simulación de partículas incluyendo la animación para la visualización del perfil de velocidad de cada traje aéreo.

2.2 Diseño de modelos

Los diseños de los modelos 3D fueron dibujados usando el software CATIA. En el caso de la prueba del túnel de agua, primero redujimos los diseños de los trajes aéreos a una longitud de mano a mano de 160 mm, un parámetro que elegimos por conveniencia, y después de esto calculamos la relación de bloqueo para asegurarnos de que tiene un valor de menos del 10 %.

Modificamos el área y el diseño de las alas sin cambiar la cola, un modelo con mayor área y otro con menor área, y viceversa. Cuando se modificó la cola, las alas permanecieron iguales. Para conocer la diferencia entre los modelos de cada diseño utilizado para la prueba, cada modelo fue etiquetado con un nombre específico dependiendo del área que se modificó, ya sea el área de las alas o de la cola, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1: Etiquetas de los modelos según el área modificada

Nombre	Descripción
Original	No tiene cambios, es solo una escala del diseño original.
Brazos 1	El área de las alas es más pequeña, el área de la cola permanece igual.
Brazos 2	El área de las alas es más grande, el área de la cola permanece igual.
Piernas 1	El área de la cola es más pequeña, el área de las alas permanece igual.
Piernas 2	El área de la cola es más grande, el área de las alas permanece igual.

El grosor de nuestros modelos 3D es el mismo para todos, 3mm. Además, cada modelo tiene una base especialmente diseñada para ajustarse al soporte construido para las pruebas del túnel de agua. Después de tener todos los diseños listos, procedimos a imprimirlos en 3D usando un cable blanco de PLA (Polylactic Acid) de 1.75mm. Después, se aplicó una capa de pintura blanca de aerosol a cada uno de los modelos, y luego, utilizando diferentes tamaños de papel de lija (P100 y luego P800), su superficie se hizo más lisa para obtener mejores resultados del flujo de agua sobre la superficie. Se trazaron líneas horizontales con 1

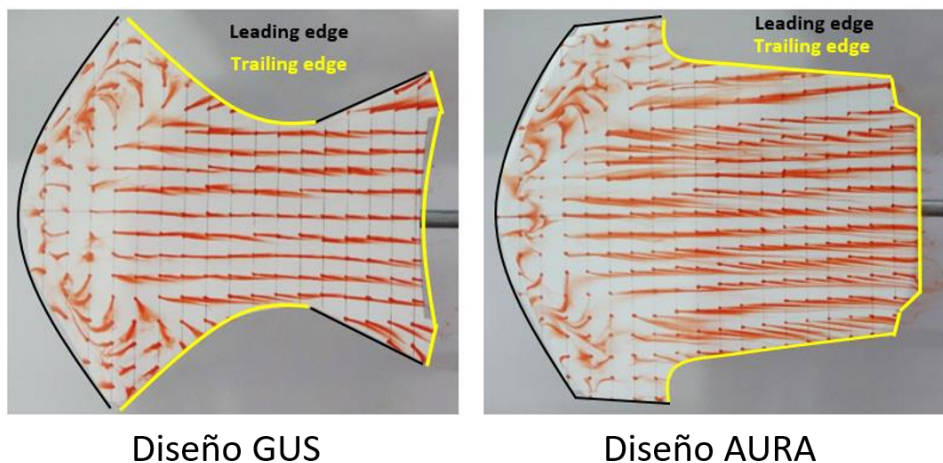


Figura 1: Método de puntos rojos, bordes de ataque y de salida de los diseños GUS y AURA Original. Fotografías propias.

centímetro de separación a lo largo de la superficie de todos los modelos como guía para lograr una mejor visualización del comportamiento del flujo.

El diseño GUS tiene dos bordes de ataque, uno en las alas del brazo y el otro en las alas de la pierna, y en consecuencia también tiene dos bordes de salida, mientras que el diseño AURA sólo tiene un borde de ataque y un borde de salida. Los diferentes bordes de ambos modelos se muestran en la figura 1 con un ángulo de ataque de 5° .

2.3 Número de Reynolds

El número de Reynolds es uno de los factores más importantes utilizados para describir o predecir las características del flujo de fluidos, como la viscosidad, el esfuerzo cortante y la compresibilidad, que son necesarios para encontrar los campos de presión que rodean a un ala, la alta presión y la baja presión que crean la sustentación, la resistencia y el vórtice del ala. Es un valor adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un fluido como el aire (Kumar *et al.*, 2005).

En el caso de los trajes aéreos, el número de Reynolds determina la naturaleza del flujo de aire sobre la superficie del traje. Para un número de Reynolds alto, las fuerzas inerciales dominan en el fluido y el flujo es más turbulento; para un número de Reynolds bajo, las fuerzas viscosas dominan y el flujo es más uniforme y laminar.

La fórmula para obtener el número de Reynolds es la siguiente:

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{\rho VL}{\mu}$$

Donde V es la velocidad, L es la longitud característica, ν la viscosidad cinemática, ρ es la densidad del fluido y μ la viscosidad dinámica del mismo. La cuerda del perfil aéreo es la longitud característica más utilizada para el número de Reynolds y la sustentación aerodinámica. Cualquier sistema que funcione con el mismo número de Reynolds tendrá las mismas características de flujo independientemente de que el fluido, la velocidad y las longitudes características sean distintas.

En el caso de los ensayos del túnel de agua, el número de Reynolds para cada modelo se calcula mediante la misma fórmula:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{997(\text{kg}/\text{m}^3) \times 0.089(\text{m}/\text{s}) \times MAC(\text{m})}{0.8937 \times 10^{-3}(\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s})}$$

donde 0.089 (m/s) es la velocidad del flujo de agua, $\rho=997$ (kg/m³) es la densidad del agua, $\mu = 0.8937 \times 10^{-3}$ (kg/m · s) es la viscosidad dinámica del agua y $MAC(m)$ (Mean Aerodynamic Chord) es la cuerda media de cada modelo. Dado que los modelos de trajes de alas tienen formas irregulares, la cuerda media de cada modelo se obtuvo dibujando nueve líneas separadas uniformemente en el modelo con la ayuda del software CATIA y calculando la longitud de la cuerda media, como se muestra en la figura 2.

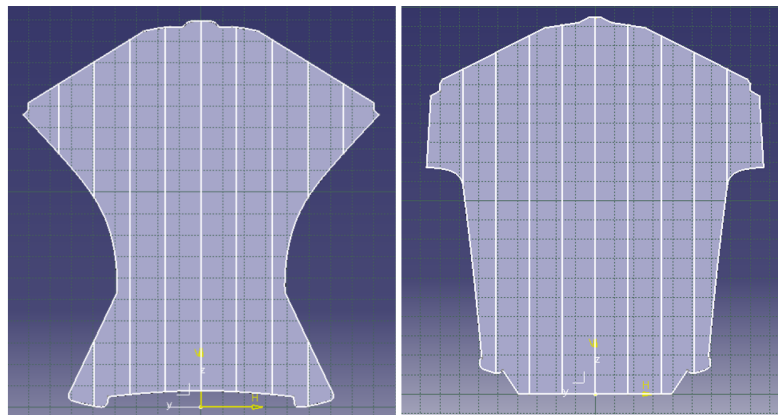


Figura 2: Método utilizado para obtener la longitud media de la cuerda media de los modelos. Figura propia obtenida con ayuda del software de diseño asistido por computadora CATIA.

Sustituyendo los resultados de MAC para los modelos a escala de los diseños GUS y AURA en la ecuación, podemos obtener el número de Reynolds de cada modelo. Los valores de MAC y su correspondiente número de Reynolds se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2: Valores de MAC y su correspondiente número de Reynolds

Modelo	GUS		AURA	
	MAC (m)	Re	MAC (m)	Re
Original	0.12141	12100	0.15561	15500
Brazos 1	0.11669	11600	0.15304	15200
Brazos 2	0.12964	12900	0.16455	16300
Piernas 1	0.11855	11800	0.15224	15100
Piernas 2	0.12403	12300	0.15844	15700

Estos resultados se compararon con el número de Reynolds de los trajes de alas de tamaño normal, calculado utilizando la velocidad media del aire de un traje aéreo, 45m/s, y la mayor longitud típica de un traje aéreo de tamaño normal, 1.77m. En este caso, los valores de la densidad y la viscosidad dinámica del aire a 1500m sobre el nivel del mar se obtuvieron interpolando los valores de la tabla de propiedades del aire atmosférico estándar de EE. UU., que dan $\rho = 1.06\text{kg}/\text{m}^3$ y $\mu = 1.742 \times 10^{-5}\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$. Introduciendo estos valores en la ecuación se obtiene:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1.06(kg/m^3) \times 45(m/s) \times 1.77(m)}{1.742 \times 10^{-5}(kg/m \cdot s)}$$

Este resultado está dentro del rango de número de Reynolds que se encontró para todo el rango de vuelo del traje aéreo (Sestak, 2017).

Según el estudio de (Chen *et al.*, 2013) sobre el rendimiento del ala delta, la diferencia del número de Reynolds prohíbe una comparación cuantitativa directa entre un experimento de traje aéreo de tamaño real y nuestro experimento de flujo en el túnel de agua, es razonable suponer que el patrón de flujo en ambos casos será bastante similar.

2.4 Prueba del túnel de agua

Se realizaron dos pruebas diferentes, una con el método de flujo de tinta y otra con el método de puntos rojos. Con estos métodos podemos ver el flujo alrededor de los modelos y el flujo en su superficie, por lo que podemos analizar diferentes características del flujo.

La prueba del túnel de agua se completó usando ángulos de ataque de 5° a 25° en incrementos de 10°, esto significa ángulos de 5°, 15° y 25°. Este rango corresponde al ángulo de ataque común en el que los pilotos de trajes aéreos vuelan directamente a la corriente libre. Los modelos de trajes aéreo se probaron a una velocidad de túnel de agua de 8.9cm/s, calculada con la siguiente fórmula:

$$U = 0.71 \times f + 0.93(cm/s)$$

Donde f es la frecuencia del convertidor de frecuencia que utiliza el túnel de agua. Esta frecuencia se fijó a $f = 12Hz$.

Una cámara Nikon de alta velocidad y resolución fue prestada por el departamento de Aeronáutica y Astronáutica de NCKU, para tomar fotos y videos durante la prueba. La configuración de la cámara para tomar fotos se estableció para tomar una ráfaga de cinco fotos con un intervalo de 0,3 segundos, mientras que para el vídeo se estableció a 60fps (fotogramas por segundo).

2.5 Método de flujo de tinta

Para este método de prueba utilizamos la estructura base mencionada anteriormente que se asienta perfectamente en la parte superior del túnel de agua, y a ésta adjuntamos cada modelo. Comenzamos a probar los modelos de nivel principiante usando dos arreglos diferentes de flujo de tinta simultáneamente. Uno consistía en dos mangueras delgadas con jeringas delgadas en las puntas, adheridas a una botella, y el otro en una manguera delgada con un tubo en forma de L en su punta, adherido a otra botella. La pintura roja (colorante para alimentos), se disolvía con agua y luego se vertía en las botellas. Cada manguera tenía un dispositivo para controlar la velocidad del flujo de tinta.

Las dos jeringas se fijaron en la parte trasera del modelo apuntando contra el flujo de agua con sus puntas en la parte exterior de las alas del brazo (justo después del borde de ataque), mientras que el tubo en forma de L apuntaba hacia la dirección del flujo de agua unos centímetros delante de la línea central de los modelos. Esto crea tres líneas de tinta, dos en la parte exterior del modelo y una en el centro. Con esto esperábamos ver el comportamiento del flujo sobre las alas del brazo y en el centro de la maqueta. En la figura 3, este arreglo puede verse en acción durante una prueba hecha para el modelo "original" en $\alpha = 15^\circ$.

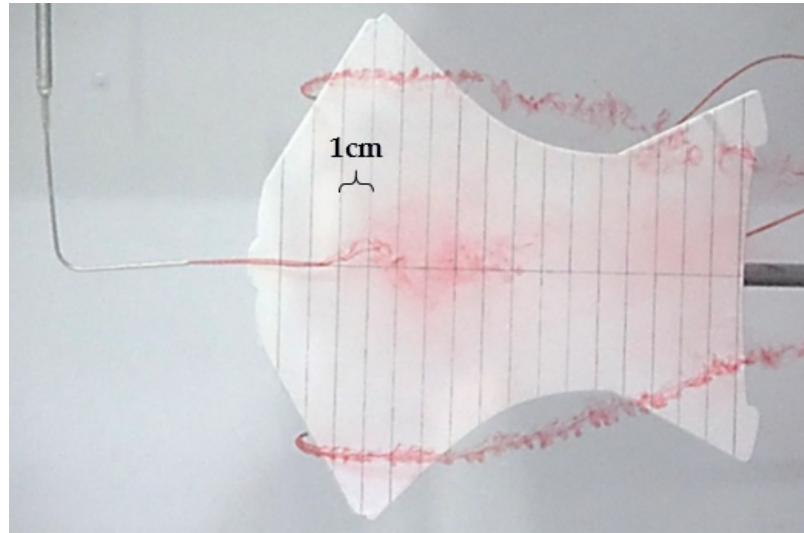


Figura 3: El modelo "GUS original" durante el método de flujo de tinta a ángulo de ataque de 15° . Fotografías propias.

2.6 Método de puntos rojos

La prueba del método de los puntos rojos consiste en dibujar puntos en la superficie de los modelos a lo largo de las líneas, como se muestra en la figura 4, para visualizar el comportamiento del flujo sobre la superficie. La pintura utilizada fue una pintura acrílica de color rojo, y se utilizó un pincel de tamaño 0 para pintar los puntos, que se encontraban a 1 cm de distancia entre sí. En este caso, se utilizó la misma estructura base para montar los modelos en el túnel de agua.

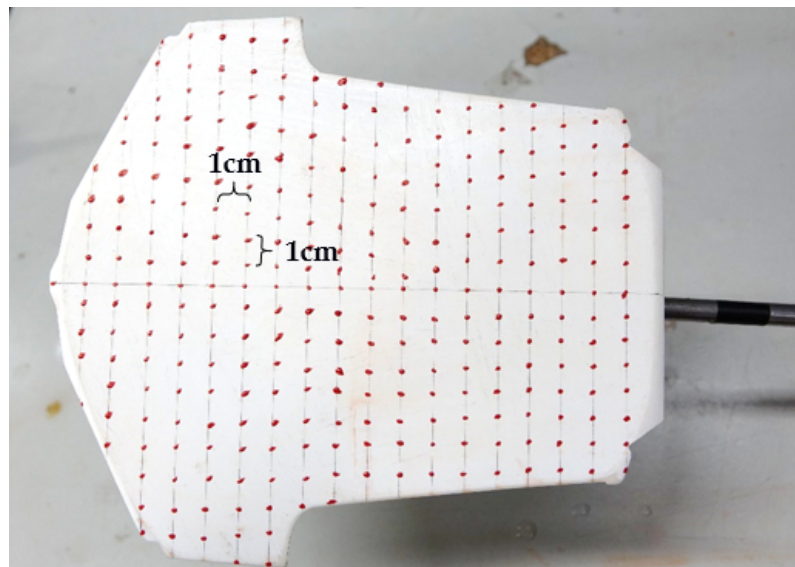


Figura 4: Configuración de los modelos de prueba del método de puntos rojos. En la imagen "Aura original" modelo de diseño. Fotografías propias.

Las pruebas se realizaron en ángulos de ataque de 5° , 15° y 25° , con la velocidad de corriente libre (velocidad del agua) mencionada anteriormente. Para el diseño GUS se probaron todos los modelos, mientras que para el diseño AURA sólo se probaron los modelos de los brazos 1, 2 y Original. Con esta prueba se

vio el comportamiento del flujo en la superficie y se analizan algunas de las características más relevantes a lo largo de las siguientes secciones.

2.7 Método de PIV (Velocimetría de imágenes de partículas)

PIV, que significa en inglés Particle Image Velocimetry, es una herramienta experimental comúnmente utilizada en la dinámica de fluidos y la aerodinámica. Se utiliza para obtener mediciones instantáneas de velocidad y propiedades relacionadas en los fluidos. El principio básico consiste en tomar fotografías a altas fotogramas por segundo (FPS) del movimiento de partículas microscópicas iluminadas en un plano del flujo con un rayo láser, que siguen el flujo del fluido. Luego se utilizan métodos de procesamiento de imágenes para determinar el movimiento de las partículas y a partir de las imágenes, computacionalmente proyectar la velocidad y la dirección del flujo (el campo de velocidad). Para analizar los datos obtenidos, los marcos se dividen en un gran número de ventanas. Esto hace posible calcular un vector de desplazamiento para cada ventana con la ayuda de técnicas de procesamiento de señales y auto correlación, que luego se convierte en una velocidad utilizando el tiempo entre cuadros y el tamaño físico de cada píxel de la cámara.

Las pruebas PIV se realizaron para dos modelos, los brazos GUS 2 y los brazos Aura 2, que se seleccionaron después de analizar el comportamiento del flujo obtenido por el método de flujo de tinta y las pruebas del método de puntos rojos. Se realizaron en un ángulo de ataque $\alpha = 15^\circ$, que se consideró el más relevante durante la prueba anterior y el promedio de ángulo de ataque durante un vuelo con traje aéreo. El modelo fue sostenido por un soporte especial prestado del laboratorio del túnel de agua, y se utilizó una regla en forma de L para medir el tamaño de las partículas y los píxeles poniéndola en el túnel de agua además del soporte y el modelo, como se muestra en la figura 5.

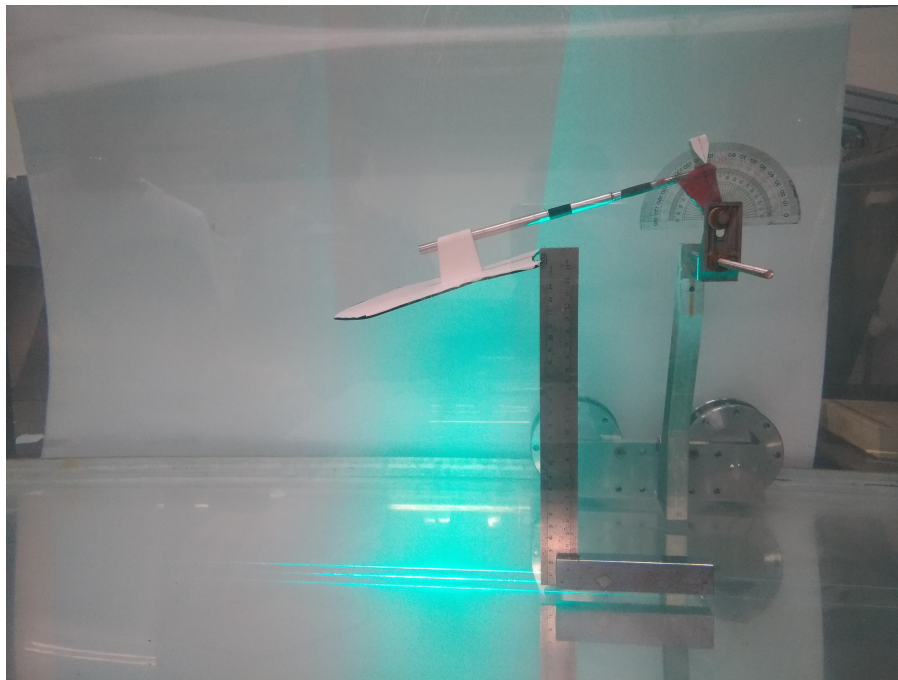


Figura 5: Soporte del modelo y el método de escala de la prueba PIV. Fotografías propias.

La disposición del láser en el túnel de agua del departamento de Aeronáutica y Astronáutica de la NCKU consistía en un sistema láser de iones Coherent Innova de alta potencia, situado bajo el túnel de agua, y

cuyo rayo se dirigía hacia arriba (véase la figura 6). Para obtener las imágenes se utilizó una cámara de alta velocidad Redlake N-4, con una configuración de 200 fotogramas por segundo para un total de 6,3 segundos, un tiempo de retardo de 5 ms, una exposición de 2 ms y un ROI (región de interés) de 1016 X 720. Toda la configuración mientras se realizan las pruebas, se muestra en la figura 6.

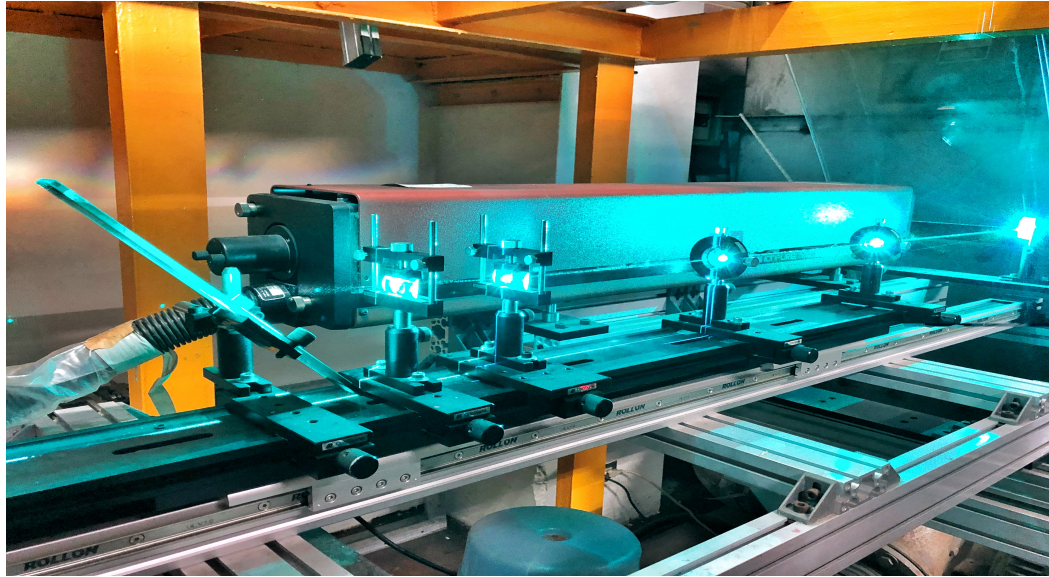


Figura 6: Sistema de láser de iones utilizado durante las pruebas PIV. Fotografías propias..

Para el análisis de los datos se utilizó el software PIV View 2C para obtener el campo de velocidad del flujo y luego se utilizó el Tecplot 360 para visualizar los datos. Dentro del software PIV View, era necesario calcular un tamaño de interrogación (interrogation size) para obtener resultados precisos, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{4} \text{ tamaño de interrogación} \geq M \times V_o \times \Delta t$$

donde:

M = factor de magnificación = pixeles / distancia de la escala (mm)

V_o = velocidad del flujo (m/s)

Δt = retraso en el tiempo entre cada fotograma (s)

3 Resultados y Discusión

Algunas imágenes obtenidas durante los experimentos del túnel de agua del método de flujo de tinta para el diseño de GUS y el método de puntos rojos para los diseños de GUS y AURA, están dispuestas y se muestran a continuación, en las figuras 7, 8 y 9 respectivamente. Estas imágenes muestran todos los diferentes modelos de diseño probados en los tres diferentes ángulos de ataque seleccionados para este experimento.

Para la prueba de flujo de tinta, la visualización del flujo mostró el comportamiento del flujo sobre los modelos, y en esta parte sólo se enfatizarán los rasgos más dominantes. Se hace una comparación de modelos de trajes aéreo de nivel principiante en diferentes ángulos de ataque (figura 7) que muestra

imágenes típicas de visualización de flujo obtenidas en ángulo de ataque, $\alpha = 5^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, y $\alpha = 25^\circ$ para un rango de número de Reynolds $11,600 < Re < 12,900$.

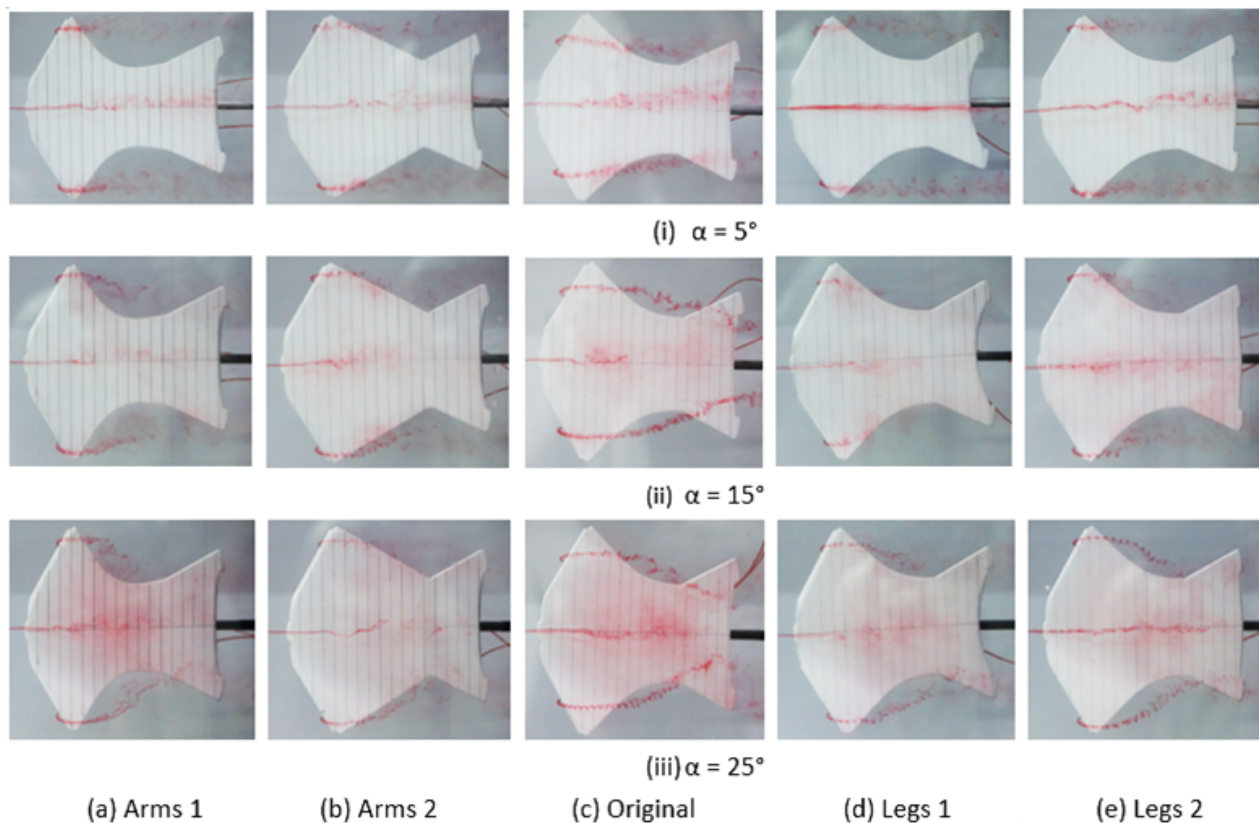


Figura 7: Método de flujo de tinta, modelos de diseño a nivel de principiante (GUS) en diferentes ángulos de ataque. Fotografías propias

Para el caso del método de flujo de tinta, se probaron todos los modelos de diseño de GUS y ninguno de los modelos de diseño de Aura. Esto se debe a que la visualización del flujo usando el método de flujo de tinta era principalmente el punto de separación del flujo y la curvatura de las rayas externas, lo que no nos decía mucho sobre el comportamiento de la elevación sobre la superficie de los modelos de trajes aéreo, y considerando que los modelos del nivel avanzado de trajes aéreo también son planos y tienen sólo pequeños cambios en su diseño, al igual que los del nivel principiante, decidimos no hacer la prueba del método de flujo de tinta con los modelos del nivel avanzado, y asumimos que los resultados serán similares.

Según los resultados obtenidos de los diseños de la GUS durante la prueba del método de puntos rojos, las características del flujo están presentes en su mayor parte en el área de las alas del brazo, por lo tanto, concluimos que las fuerzas de elevación se generan en su mayor parte cerca del borde de ataque y son más significativas en los brazos. Debido a esto, para el diseño avanzado (AURA) los modelos de "Piernas" no fueron probados, y todos los resultados siguientes se centran más en el original, los brazos 1 y 2 de ambos modelos de diseño GUS y Aura.

A primera vista, los fenómenos de flujo de los modelos AURA son similares en cada ángulo de ataque, independientemente de su estructura de brazo. Todos se comportan de manera similar, desplazando la línea de separación del flujo proporcionalmente con la incrementación del ángulo de ataque, y va generando atractivas geometrías de vórtices en las alas. La razón por la que no hay muchas variaciones

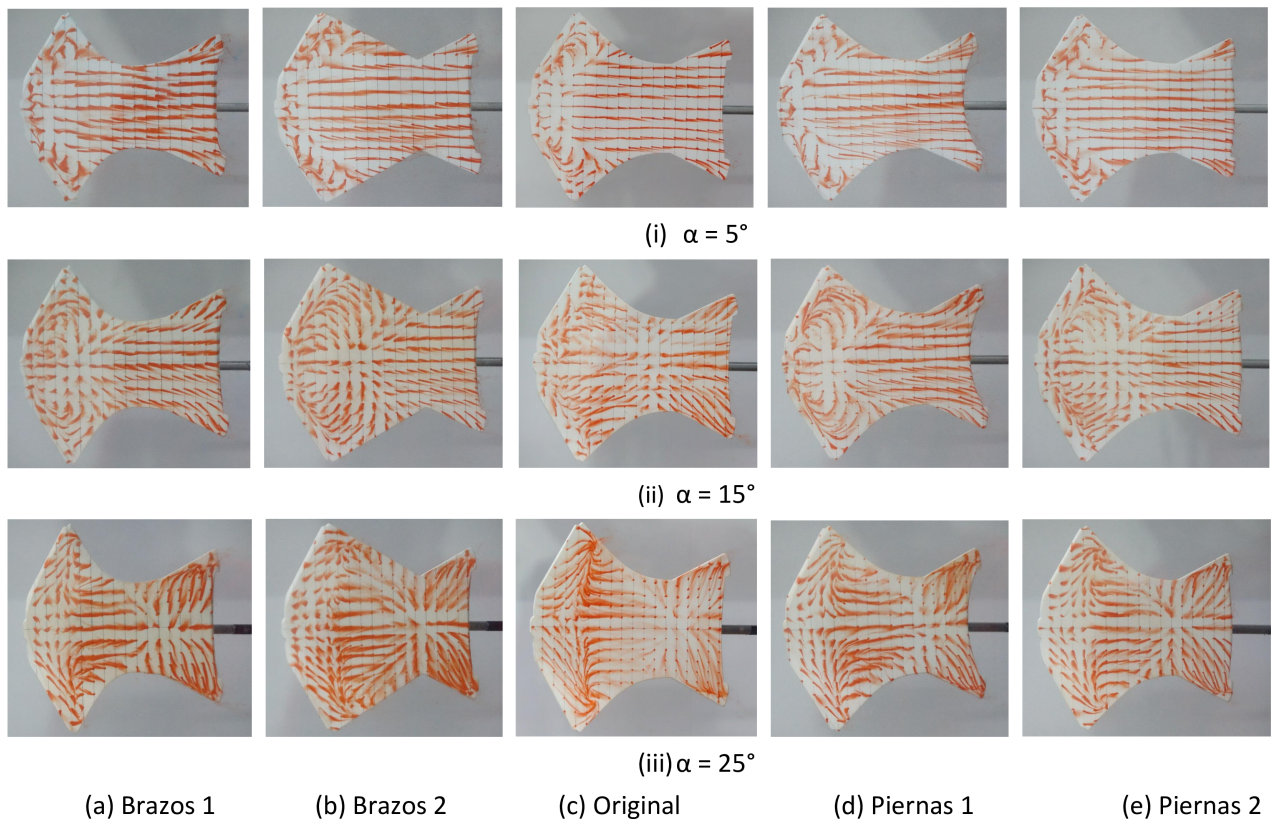


Figura 8: Método de puntos rojos, modelos de diseño principiante (GUS). Fotografías propias.

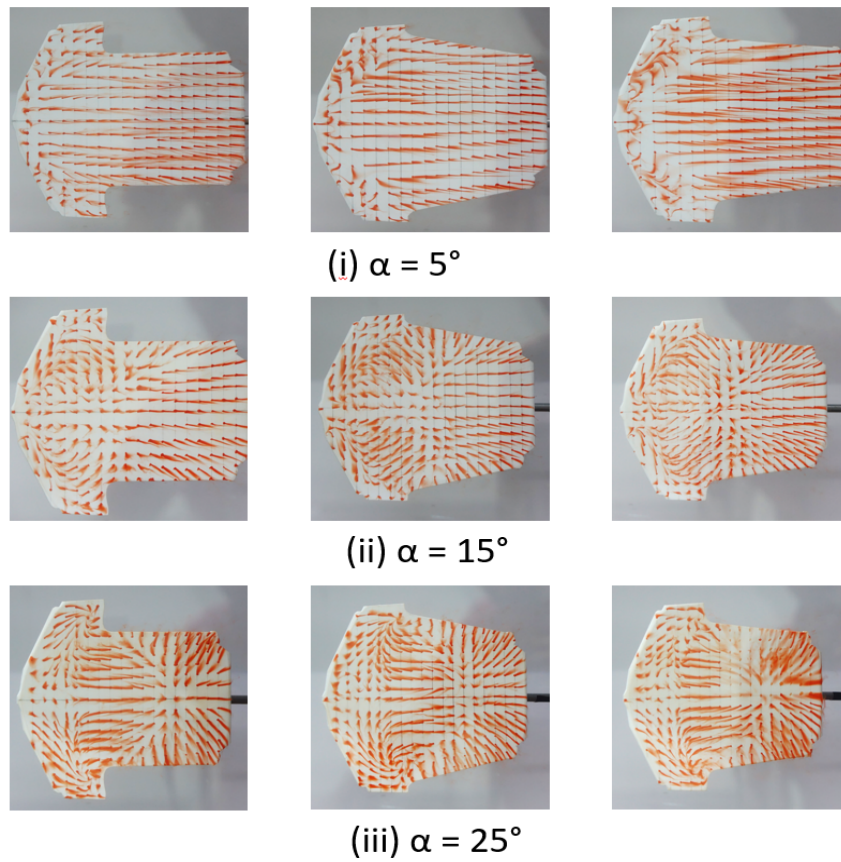


Figura 9: Método de puntos rojos, modelos de diseño de nivel avanzado (AURA). Fotografías propias.

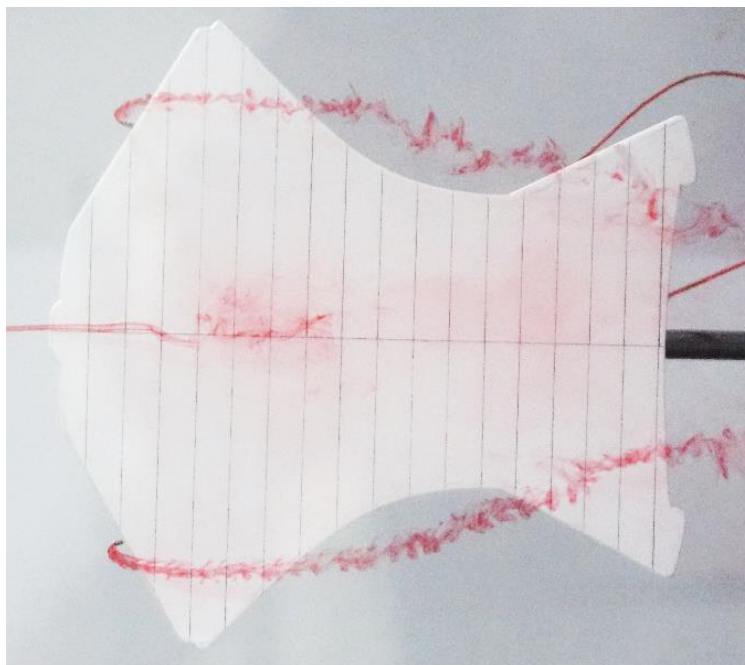


Figura 10: Características de flujo sobre el modelo original de GUS en $\alpha = 15^\circ$. Fotografías propias.

geométricas de flujo en los modelos es en parte porque todos comparten una forma rectangular similar, y la modificación de las estructuras de las alas son pequeñas comparadas con el área del modelo.

3.1 Modelo original

Aquí se analizan los modelos originales de GUS y Aura para describir, a partir de la visualización del flujo, el comportamiento del flujo y las características del mismo sobre la superficie. En este caso, los resultados son mostrados para el método de flujo de tinta y el método de puntos rojos, con un ángulo de ataque de $\alpha = 15^\circ$. La simetría sobre la línea central se asume para todos los resultados siguientes.

En el caso del GUS original en el ángulo de ataque de 15° (figura 10), la línea media tiene claramente un punto de separación de flujo situado a 3cm del borde de ataque, en el que el flujo se vuelve turbulento y el tinte simplemente se expande al fluir río abajo. Las rayas exteriores tienen espirales formadas en el borde de ataque que fluyen hacia atrás del modelo y hacia la línea central.

El modelo original de GUS a 15° (figura 11, (a)), tiene varios cambios en la dirección del flujo y un total de 4 vórtices situados a aproximadamente 1cm y 7cm de la línea central a ambos lados. En contraste, para el modelo original de AURA a 15° (figura 11, (b)), la dirección del flujo invertido es hacia adentro, hacia la línea central, donde se crean dos vórtices a aproximadamente 1cm de la línea central.

3.2 Discusión de los modelos GUS

En un ángulo de ataque de 5° , la línea de separación de todos los modelos se encuentra a 2.5cm del borde de ataque y muestra una forma parabólica similar a la de los modelos AURA en este mismo ángulo. También se puede ver la inestabilidad del vórtice que aparece por encima del borde de ataque de las alas del brazo que se genera por el flujo que pasa por el borde de ataque hacia el centro del modelo. Después del punto de separación, el flujo fluye uniformemente en paralelo a la velocidad de flujo libre.

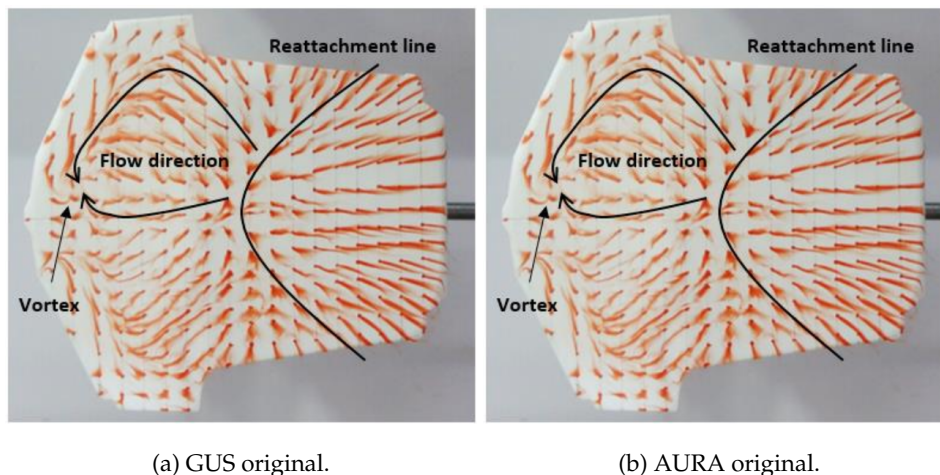


Figura 11: Método de puntos rojos, características de flujo de los diseños de GUS y AURA Original. Imágenes propias.

A medida que el ángulo de ataque aumenta en el flujo constante hasta un rango entre 5° y 15° , la línea de separación progresa gradualmente hacia adelante (hacia el borde de salida) y a una distancia variable para cada modelo. La razón por la que esto sucede es porque el modelo GUS contiene dos bordes de ataque y de salida, tanto para los brazos como para las piernas.

Lo que sucede con el modelo GUS cuando el ángulo de ataque se incrementa a 25° , es que la línea de reimplantación se desplaza ligeramente después del inicio del borde de ataque de la pierna de los modelos a 12.5 cm del borde de ataque de los brazos, como se ve en la figura 12. La forma geométrica no parece tener gran influencia en el comportamiento de flujo para el modelo GUS. Estos fenómenos de flujo se pueden observar en los cinco modelos GUS.

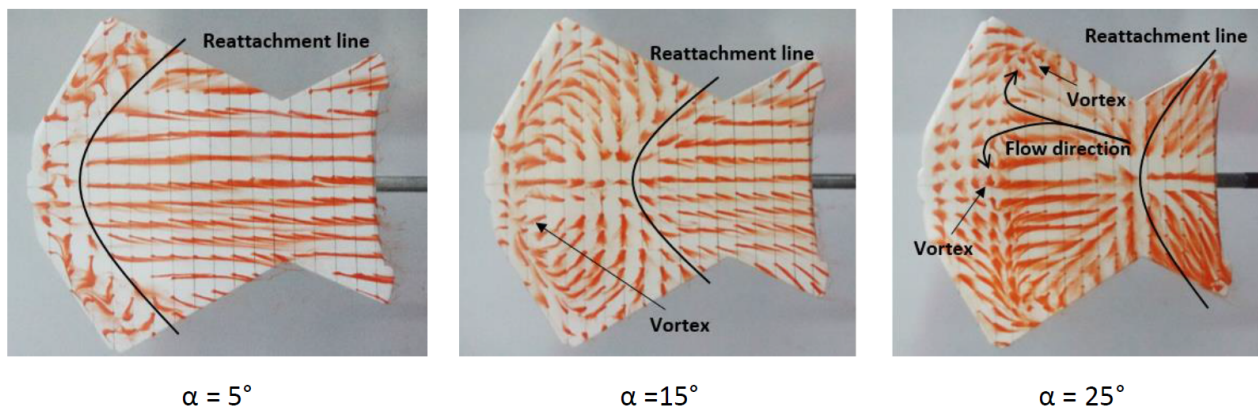


Figura 12: El modelo del brazo 2 del GUS durante la prueba del método de puntos rojos. Imágenes propias.

3.3 Discusión de los modelos AURA

Se observa fácilmente que los modelos dentro del ángulo de ataque de 5° tienen un patrón de flujo muy similar en sus estructuras. Esto puede apreciarse como la línea de separación de los tres modelos de Aura, el original (figura 13), los brazos 1 (figura 14) y los brazos 2 (figura 15), están a menos de 3cm del borde de

ataque de los modelos. La razón por la que esta línea de separación parabólica en el modelo AURA está en las proximidades del borde de ataque es porque los modelos AURA sólo tienen un borde de ataque; en contraste con el modelo GUS para principiantes, que tiene dos bordes de ataque.

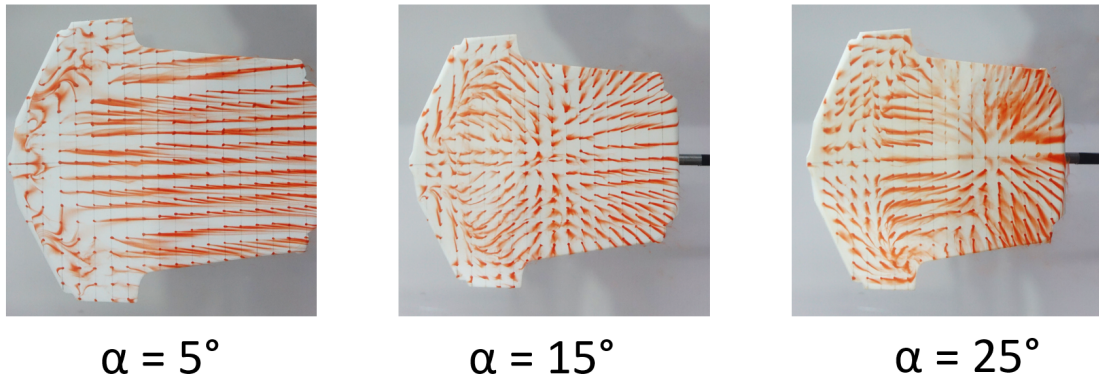


Figura 13: El modelo original del aura durante la prueba del método de puntos rojos. Fotografías propias.

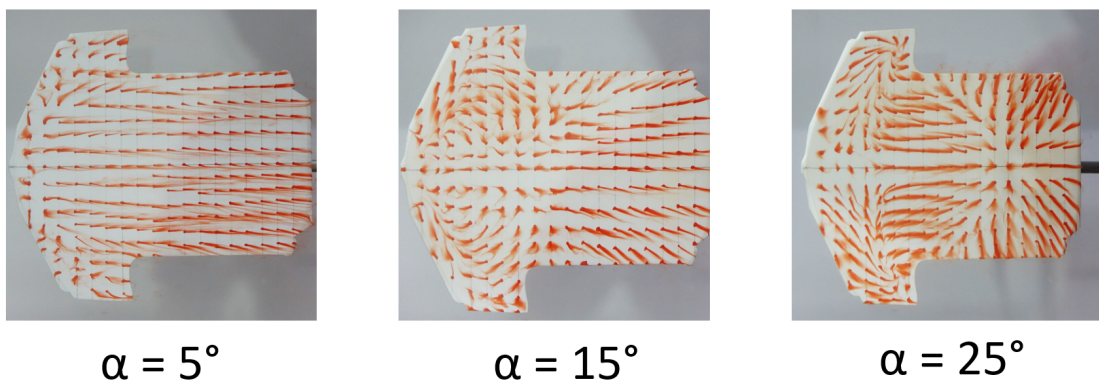


Figura 14: Modelo del brazo 1 de AURA durante la prueba del método de puntos rojos. Fotografías propias.

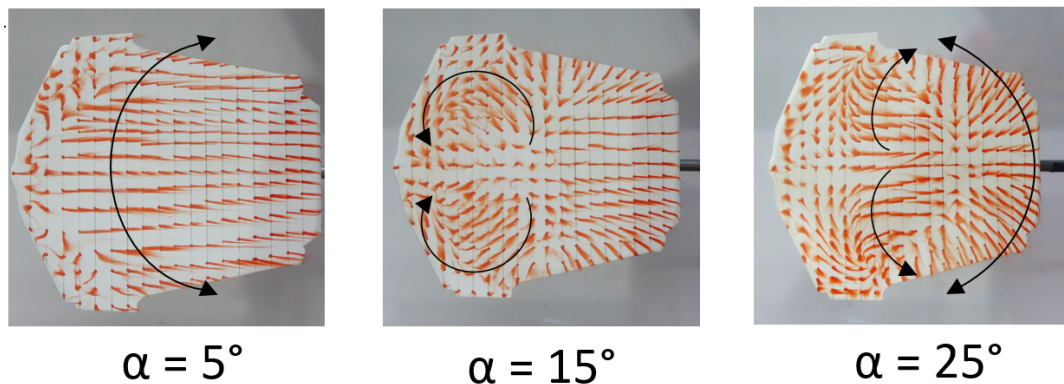


Figura 15: Modelo del brazo 2 de AURA durante la prueba del método de puntos rojos. Fotografías propias.

A medida que el ángulo de ataque aumenta de 5° a 15° , la línea de separación se desplaza unos 5cm río abajo, esto es, a unos 8cm del borde de ataque, y se desvía (actúa en dirección negativa), como se ve en la figura 14, generando así un vórtice que actúa en sentido contrario a las agujas del reloj, debido a la interacción de este flujo con el flujo libre, que fluye desde el borde de ataque de las alas en dirección positiva. A pesar de que los modelos tienen una estructura de brazo diferente, a un ángulo de ataque de 15° , todos comparten un patrón de vórtice similar. Cuando el ángulo de ataque de los modelos está a 25° , la línea de separación está a 14cm del borde de ataque de todos los modelos, a pesar de que tienen una estructura de brazo diferente. El radio de esta curva de separación parabólica (en dirección negativa) ha disminuido debido al aumento de la diferencia de presión en el borde de ataque del ala. La dirección de los vórtices también ha cambiado, pasando de fluir hacia el centro de la superficie a fluir hacia los bordes laterales de las alas del brazo.

Los fenómenos de flujo de los modelos AURA son similares en cada ángulo de ataque, independientemente de su estructura de brazo. Todos se comportan de manera similar, desplazando la línea de separación del flujo tan proporcionalmente como aumenta el ángulo de ataque, y generando geometrías de vórtices de buen aspecto en las alas. La razón por la que no hay muchas variaciones geométricas de flujo en los modelos es en parte porque todos comparten una forma rectangular similar, y la modificación de las estructuras de las alas son pequeñas comparadas con el área del modelo.

3.4 Resultados de la prueba PIV

Aquí se discute el campo de flujo sobre los modelos de trajes aéreo que muestran los vectores de magnitud obtenidos usando PIV View 2 y el software Tecplot. Se seleccionaron tres planos diferentes como se muestra a continuación, en la figura 16:

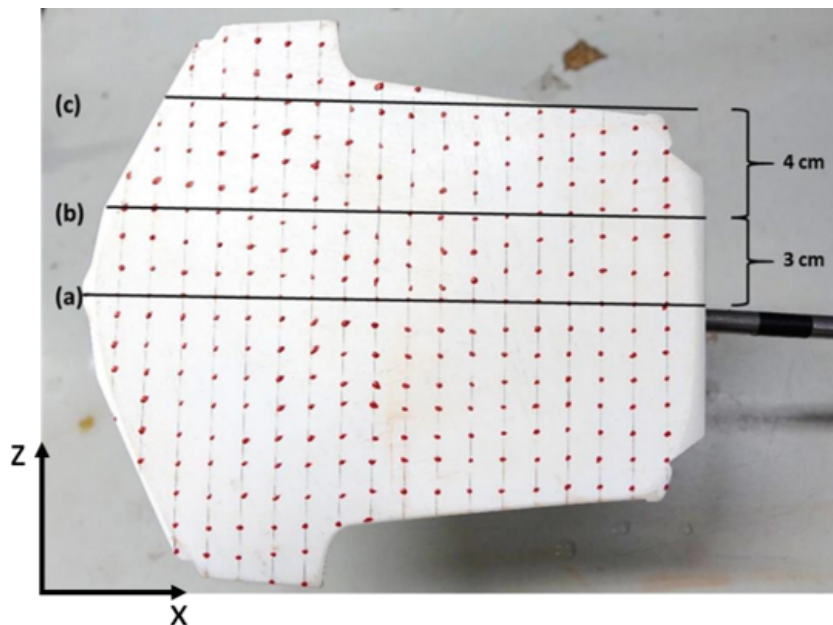


Figura 16: Plano (a), (b) y (c) proyectado en el modelo AURA. Imágenes propias.

- (a) El plano de la hoja de láser en la línea central.
- (b) El plano de la hoja de láser a 3cm de la línea central.

(c) El plano de la hoja láser a 7cm de la línea central.

Los modelos probados en el PIV son los brazos 2 de GUS y de AURA, ambos en 15° , que fueron seleccionados después de obtener los resultados de los métodos de prueba anteriores, y sus respectivos resultados en el plano (b) se muestran a continuación.

Recordemos que los resultados de la prueba PV proyectan gráficamente la velocidad y la dirección del flujo, y así, el campo de velocidad.

Los vectores de magnitud que actúan en la superficie superior de los modelos de trajes aéreo pueden verse como pequeñas flechas direccionales en los gráficos y el campo de velocidad es visualizado con colores, que varían desde 10mm/s en azul, hasta 140mm/s en rojo.

La siguiente figura nos ayuda a visualizar la relación de los resultados de la prueba PIV con respecto a la posición del modelo y soporte en el túnel de agua que observamos en la figura 5.

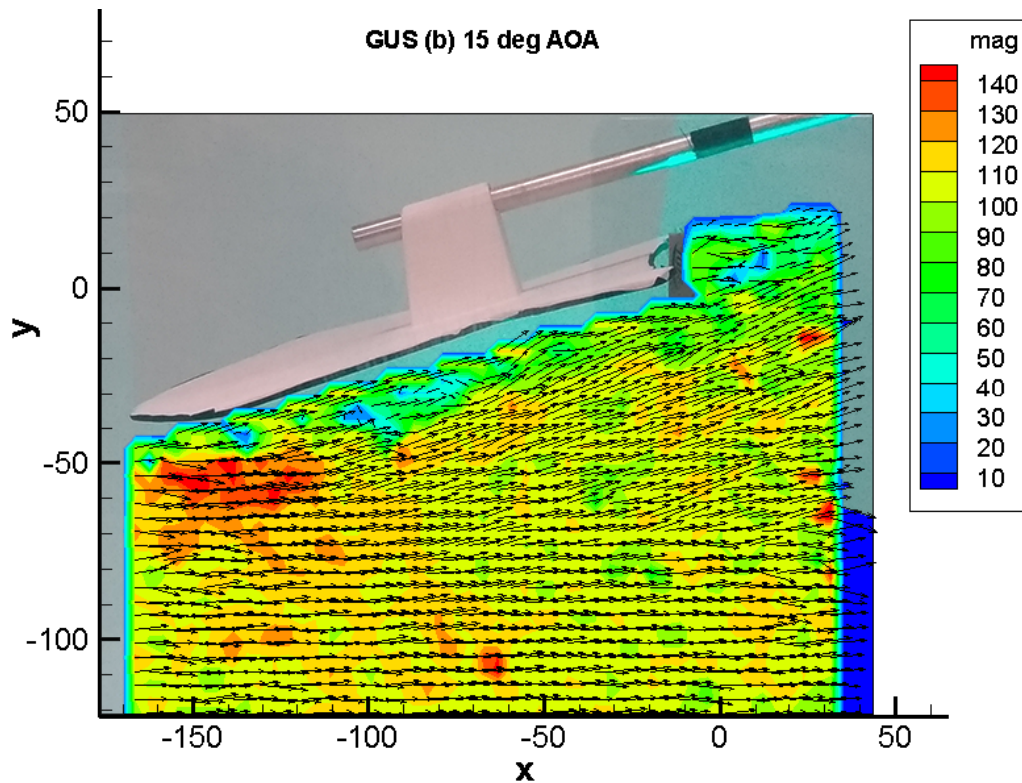


Figura 17: Campo de velocidad del diseño de Brazos 2 de GUS en el plano (b) en 15° , montado sobre la figura 5. Imágenes propias.

La Figura 18 y 19 nos muestran el campo de velocidad obtenida con ayuda del software Tecplot ©. Decidimos no incluir el análisis vectorial del área ocupada por la imagen en la figura 17, y por eso se verá en color azul.

Nótese que los resultados de la prueba PIV de los planos (a) y (c) de ambos modelos son omitidos en este artículo ya que estos no muestran cambios significativos.

El plano (a) de ambos diseños muestra un campo de flujo constante de una magnitud de unos 90mm/s , que se muestra en color verde. Esto concuerda con la velocidad del flujo de agua utilizada durante la prueba que fue $V = 89\text{mm/s}$.

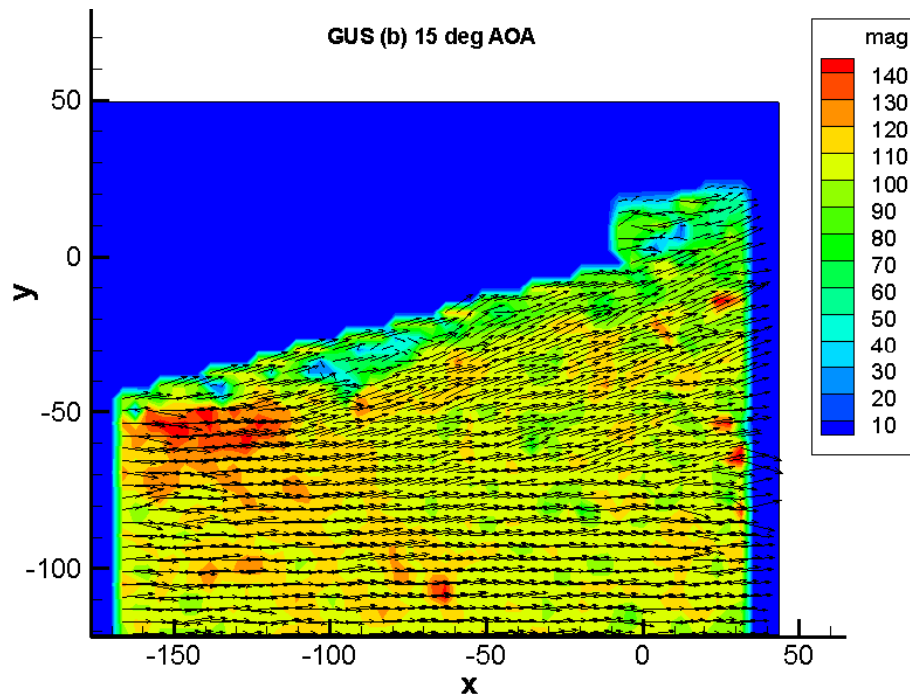


Figura 18: Campo de velocidad del diseño de Brazos 2 de GUS en el plano (b) en 15°. Figura propia obtenida con ayuda del software Tecplot ©.

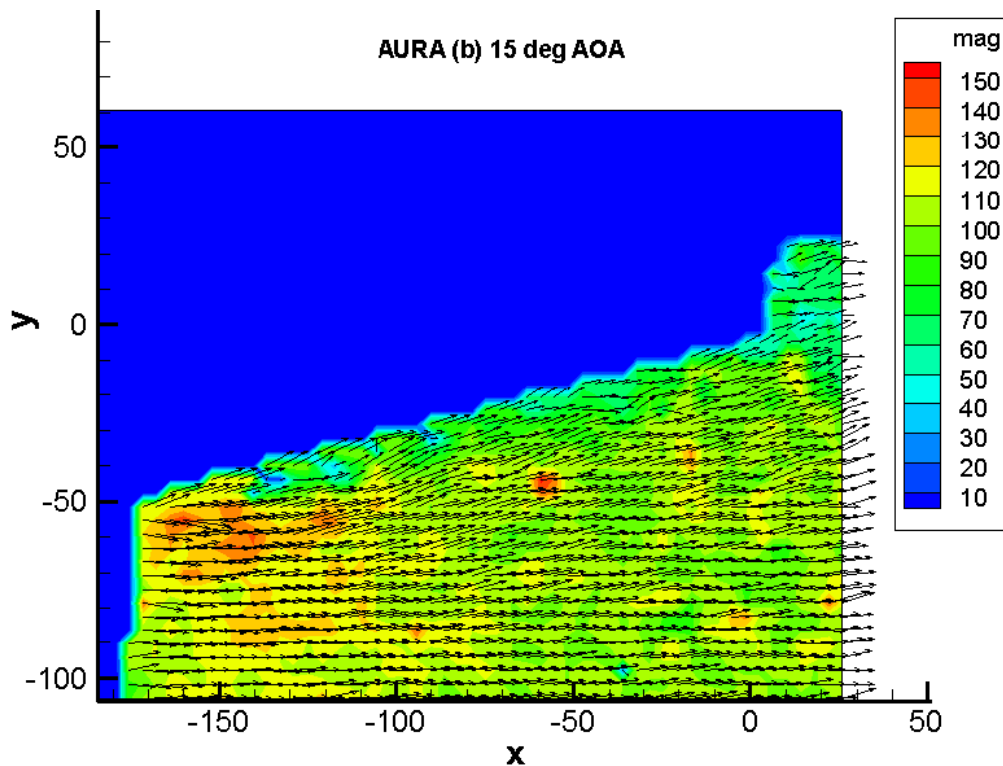


Figura 19: Campo de velocidad del diseño de Brazos 2 de AURA en el plano (b) en 15°. Figura propia obtenida con ayuda del software Tecplot ©.

Para el plano (b) (figuras 18 y 19), muestran vectores de mayor magnitud cerca del borde de ataque para ambos modelos de los brazos GUS 2 y AURA 2. La velocidad de los vectores aumenta significativamente cerca del borde de ataque tanto para los modelos GUS como para los AURA hasta unos 130 a 140mm/s, como se muestra en el color rojo y naranja. También, un cambio más obvio en la dirección del flujo puede verse cerca de la superficie de los modelos.

Para el plano (c), la magnitud de la velocidad es menor que la observada en el plano (b), teniendo una velocidad máxima de aproximadamente $V = 140\text{mm/s}$. Además, el flujo cerca de la superficie muestra una inversión de la dirección del flujo, produciendo algunos vórtices. Esto se debe a que la lámina láser corta el borde de salida de las alas del brazo, creando un campo de flujo más complejo, como puede verse en ambos gráficos.

Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por el método de puntos rojos. Demuestran que las líneas de reimplantación que se visualizaron durante el método de puntos rojos se producen en el lugar obtenido. Además, los gráficos también prueban que los componentes de elevación del flujo se concentran en su mayoría más cerca del borde de ataque, en las alas del brazo.

4 Conclusiones

En este estudio realizamos la prueba del túnel de agua utilizando tres métodos diferentes, el método de los puntos rojos, el método del flujo de tinta y la prueba PIV, para investigar la aerodinámica de un traje aéreo. Más específicamente, el flujo en la superficie y cerca de ella utilizando diferentes enfoques como se menciona a lo largo de este artículo. Se puede ver en este estudio que hay más vórtices concentrados en la región de las alas del brazo. Esto sucedió en ambos diseños y fue más notorio en los ángulos de ataque más altos, y más lejos de la línea central de los modelos. En cuanto al rendimiento, el modelo GUS es más estable debido a la menor superficie. Además, tiene dos bordes de entrada y dos de salida, lo que provoca un flujo más complejo cerca de su superficie, lo que a su vez crea una mayor resistencia y una menor velocidad. Por otro lado, el diseño de AURA es menos estable debido a la mayor superficie. Además, debido al campo de flujo más estable y constante cerca de la superficie, da menos resistencia, lo que a su vez permite que el traje aéreo vuele a mayores velocidades. Por lo tanto, los modelos GUS son adecuados para los pilotos principiantes, mientras que los modelos AURA para los pilotos experimentados.

Los resultados de este estudio son importantes para nosotros, porque hemos adquirido conocimientos y experiencia sobre los fenómenos y características que intervienen en un flujo de fluidos y los diferentes métodos utilizados para obtenerlos. Además, este estudio podría ser de beneficio para la comunidad de trajes aéreo y/o cualquier persona interesada en este tema para su estudio posterior.

5 Referencias

- Bisharat, A. (2015). Watch: Pilot pioneers harrowing, low-level, wingsuit. *National Geographic*. Recuperado de: <http://news.nationalgeographic.com/2015/05/150526-wingsuit-base-jump-moabnational-parks-blm-potter/>.
- Chen, H., Pan, C., y Wang, J. (2013). Effects of sinusoidal leading edge on delta wing performance and mechanism. *Sci. China Technol. Sci.*, p. 772-779.
- Engin, A. E. y Kaleps, I. (1980). Active muscle torques about long-bone axes of major. *Aviation, space, and environmental medicine*, pp. 551-555.

Kumar, B., Marshall, D. M., y De Remer, D. (2005). *An Illustrated Dictionary of Aviation*. McGraw-Hill Professional.

Robson, G. y D'Andrea, R. (2010). Longitudinal stability analysis of a jet-powered wingsuit.

Sestak, T. A. (2017). The effect of surface materials and morphology on wingsuit aerodynamics.