

Determinación de la relación de aspecto de un ala con base en su cuerda aerodinámica media

Determining the Aspect Ratio of a wing based on its Mean Aerodynamic Chord

José Arturo **Correa-Arredondo**¹, Tiburcio **Fernández-Roque**², Jorge **Sandoval-Lezama**³,
Alejandro **Mejía-Carmona**⁴, Víctor Manuel **Sauce-Rangel**⁵

Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0005-5279-891X | jacorrea@ipn.mx

² ORCID: 0009-0001-8285-5509 | tfernandez@ipn.mx

³ ORCID: 0009-0009-0585-5335 | josandoval@ipn.mx

⁴ ORCID: 0009-0001-4359-2099 | almejia@ipn.mx

⁵ ORCID: 0000-0003-1333-9153 | vsaucer@ipn.mx

Recibido 24-11-2023, aceptado 20-03-2024.

Resumen

La relación de aspecto o alargamiento de un ala tiene su origen en el concepto de la esbeltez, entendida como el aspecto visual que resulta de comparar su longitud con su anchura, es decir, su envergadura entre su cuerda, pero considerando una forma rectangular, lo que, a su vez, permite obtener el mismo resultado al relacionar el cuadrado de la envergadura entre su superficie alar, siendo esta última, la convención actual para calcular el alargamiento de cualquier ala. Esto tiene el inconveniente de no cuantificar los efectos entre diferentes formas de alas. Mismas envergaduras y áreas darán los mismos alargamientos sin importar las formas. Por ello, en este trabajo se propone reconsiderar la manera de calcular el alargamiento, recuperando su concepto original con base en la esbeltez, utilizando la cuerda aerodinámica media, la que, en su determinación, sí toma en cuenta la geometría de cada ala. Para comparar y cuantificar las diferencias, se realizó un estudio comparativo con cinco alas de geometrías muy distintas, a las que se les calcularon sus alargamientos, sus cuerdas aerodinámicas medias, sus factores de Oswald; sus coeficientes de arrastre inducido y sus finezas aerodinámicas. Se presentan resultados que hacen notar importantes diferencias cuando se aplica la convención actual para el alargamiento y cuando se calcula usando la cuerda aerodinámica media aquí sugerida, al resultar diferencias de hasta de un 7.48 % en la eficiencia o fineza aerodinámica.

Palabras clave: aerodinámica, esbeltez, alargamiento, ala, cuerda.

Abstract

The aspect ratio of a wing has its origin in the concept of slenderness, understood as the visual aspect that results from comparing its length with its width, that is, its span between its chord, but considering a rectangular shape, it which, in turn, allows us to obtain the same result by relating the square of the wingspan to its wing surface, the latter being the current convention for calculating the aspect ratio of any wing. This has the disadvantage of not quantifying the effects between different wing shapes. The same spans and areas will give the same aspect ratio regardless of the shapes. Therefore, in this work it is proposed to reconsider the way of calculating aspect ratio, recovering its original concept based on slenderness, using the average aerodynamic chord, which, in its determination, does consider the geometry of each wing. To compare and quantify the differences, a comparative study was conducted with five wings of quite different geometries, for which their aspect ratio, their average aerodynamic chords, their Oswald factors were calculated, their induced drag coefficients and their fine aerodynamics. Results are presented that highlight significant differences when the current convention for aspect ratio is applied and when it is calculated using the average aerodynamic chord suggested here, resulting in differences of up to 7.48% in aerodynamic efficiency or fineness.

Index terms: aerodynamic, slenderness, aspect ratio, wing, chord.

I. INTRODUCCIÓN

El alargamiento, AR , o relación de aspecto, o *aspect ratio* en inglés, es un parámetro que se originó con el desarrollo de la aviación, como una manera de diferenciar el aspecto visual de las alas en cuanto a sus proporciones, es decir, sus diferencias en cuanto a su esbeltez, pero considerando que, en esos inicios, las formas de las alas, en sus vistas en planta, eran básicamente rectangulares.

En una revisión de la literatura técnica y en la fuente más antigua consultada [1] de 1947, el alargamiento se define como una relación de esbeltez, es decir, una relación de la envergadura, b , entre la cuerda, c , esto para un ala de forma rectangular y que corresponde a la geometría más simple.

Es aquí donde se destaca el alargamiento, como se verá más adelante, este parámetro tiene un gran protagonismo en los cálculos de la aerodinámica de las alas, por ello se le debe conferir una especial importancia.

En la figura 1 se muestran dos aviones con fuselajes y estabilizadores horizontales iguales, pero con alas de alargamientos diferentes. Es evidente que, por su aspecto, el ala del avión de la izquierda es más esbelta que el ala del avión de la derecha, aunque ambas tienen la misma superficie alar.

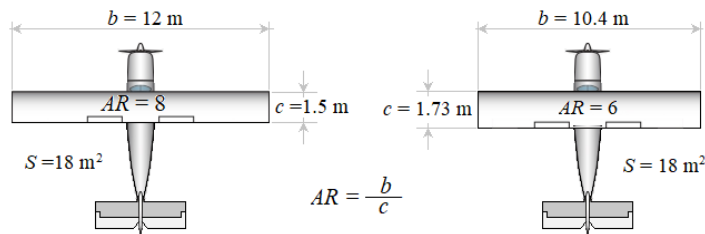


Fig. 1. Aspecto visual de dos alas con diferentes alargamientos.

Al seguir evolucionando el diseño y la construcción de aviones, se probaron otras formas de alas, distintas a la rectangular como se observa en los aviones de la figura 2.



Fig. 2. Aviones con alas de geometrías diferentes.

Aquí se presenta una cuestión y la primicia para el desarrollo de este trabajo. Por sus aspectos, ¿cuáles serían los alargamientos de las alas de los tres aviones de la figura 2? ¿De las tres, cuál ala es más esbelta y cuál es menos esbelta?

Para determinar los alargamientos, según el concepto original, se requieren las envergaduras y las cuerdas para cada ala de cada avión. La envergadura se define como la longitud transversal máxima de un ala entre sus extremos (o puntas) y la cuerda se define como la distancia entre el borde de ataque y el borde de salida, siendo la mayor cuerda que puede trazarse en un perfil aerodinámico [5]. Cabe señalar que, a lo largo de la envergadura, se considera que hay una sucesión infinita de perfiles y, por lo tanto, de cuerdas. En cuanto a la envergadura, queda claro que, en cada ala, solo habrá una, sin importar su forma geométrica. Pero para alas no rectangulares, siempre habrá más cuerdas y de diferentes medidas, como en la raíz o centro del ala, en la punta y en cualquier punto a lo largo de la envergadura, complicando entonces decidir cuál cuerda usar.

En la literatura consultada, el problema, aparentemente se solucionó haciendo que el alargamiento, en lugar de depender de una cuerda, dependa ahora de la superficie alar que, por su definición, cada ala solo tiene un valor, [5], y de esta manera se sacó de escena a la cuerda para aparentemente solucionar el problema de cuál cuerda utilizar.

Por lo tanto, al partir de la base de un ala de forma rectangular, el alargamiento se ha calculado, desde su origen, y para cualquier forma, con la relación de su envergadura elevada al cuadrado entre su superficie alar [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], lo cual, en este trabajo, se considera como una solución por convención y que probablemente está limitada al no tomar en cuenta las diferentes formas de las alas.

Como se dijo anteriormente, el alargamiento tiene una gran importancia en los cálculos de la aerodinámica de un ala, por ello es importante saber cuál es su afectación. También queda entendido que la aerodinámica depende de la geometría (forma y dimensiones) de un objeto, en este caso, del ala y de las características del fluido en cuestión, en este caso el aire atmosférico, donde debe haber una velocidad relativa entre ambos.

De entre los cálculos y parámetros que se consideran más importantes en la aerodinámica de un ala, se encuentra su fineza aerodinámica, representada por $\beta=C_l/C_d$, como una manera de cuantificar su eficiencia [10]. Esta fineza resulta de comparar la capacidad de generar fuerza de sustentación en contraste con la reacción o consecuencia inevitable de producir resistencia al avance. Por ejemplo, en un ala con fineza igual a diez, significa que, por cada 10 unidades de fuerza de levantamiento, el ala producirá 1 unidad de fuerza de resistencia al avance.

Por lo tanto, es muy importante poder cuantificar cómo es que el *AR* afecta a dicha fineza aerodinámica. Se sabe que la resistencia al avance o arrastre tiene dos componentes, uno conocido como arrastre parásito y otro como arrastre inducido [10]. En este último, el *AR* tiene un efecto inversamente proporcional, es decir, a mayor alargamiento, menor resistencia al avance y, por lo tanto, mayor fineza aerodinámica.

Entonces, si se hace el ejercicio de suponer que los aviones de la figura 2 tuvieran una misma envergadura y una misma superficie alar, resultaría que las tres alas tendrían exactamente el mismo alargamiento. Pero, sus relaciones de aspecto, como idea original del alargamiento, ¿son realmente iguales?, ¿el efecto aerodinámico será el mismo?, ¿los tres aviones tendrían la misma fineza aerodinámica?

Responder a estas preguntas puede suponer un avance, por ello, en el desarrollo de este trabajo, se propone la hipótesis que reconsidera el modo de calcular el alargamiento, buscando que las diferencias de formas también afecten el resultado de este. Se revisará lo que se conoce con respecto a cómo afecta teóricamente el alargamiento, en la aerodinámica de un ala y, en un siguiente trabajo, se pretende realizar una investigación experimental para verificar lo que se concluya en los resultados teóricos obtenidos aquí.

II. DESARROLLO

En el cálculo de la relación de esbeltez o alargamiento, para alas no rectangulares, pareciera ser una buena solución haber quitado del escenario a la cuerda, dada su variación a lo largo de la envergadura, y en su lugar, utilizar a la superficie alar cuyo valor es único en cada ala, al igual que la envergadura. De la definición original, que surgió de un ala rectangular [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], se tiene:

$$AR = \frac{b}{c} = \frac{b}{c} \frac{b}{b} = \frac{b^2}{S} \quad (1)$$

Dado el interés por conocer los efectos aerodinámicos que puede implicar el alargamiento, pero sin desatender la forma particular de cada ala, se propone ahora utilizar a la cuerda aerodinámica media, CAM , que se define como la longitud de la cuerda que, cuando se multiplica por el área del ala, la presión dinámica y un coeficiente promedio de momentos alrededor de un centro aerodinámico ($C_{M_{ca}}$), da el momento total alrededor del centro aerodinámico, *c.a.*, del ala [13].

Dicha CAM , surge del cálculo del momento de cabeceo del ala, M , que es un parámetro aerodinámico, y que al mismo tiempo implica la forma específica de cada ala, para de esta manera regresar al concepto original de la esbeltez que relaciona la envergadura con una cuerda.

Por lo tanto, se propone reconsiderar la manera convenida para el cálculo del AR de la ecuación (1) y utilizar entonces la ecuación (2):

$$AR = \frac{b}{CAM} \quad (2)$$

Al reconocer la deducción de la CAM , se justifica la afirmación de que, en ella se han involucrado tanto la aerodinámica como la forma de cada ala. Dicha deducción parte del cálculo del coeficiente de momentos de cabeceo del ala, conforme a la ecuación (3), [14-15]:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S c} = \frac{M}{q S c} \quad (3)$$

En donde

C_m es el coeficiente de momento de cabeceo en un perfil del ala.

M es el momento de cabeceo del ala.

ρ es la densidad del aire.

V_∞ es la velocidad del flujo de aire sin perturbar.

S es la superficie alar.

c es la longitud en cada perfil aerodinámico del ala.

q es la presión dinámica del flujo.

Como se mencionó en la introducción, un ala se compone de una sucesión *infinita* de perfiles a lo largo de su envergadura, implicando también una cantidad *infinita* de cuerdas. En un ala rectangular, todas las cuerdas tendrán la misma longitud, mientras que, en alas no rectangulares como las mostradas en las figuras 2 y 3, se tendrá una n cantidad de longitudes de cuerdas. A partir de esta característica y con base en la ecuación (3), se dedujo la ecuación (4) para calcular la CAM de cualquier ala sin importar su forma [14], [15].

5

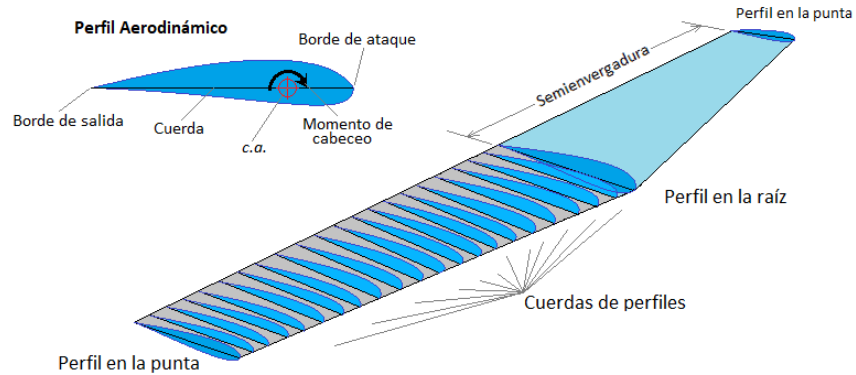


Fig. 3. Representación de los perfiles y cuerdas en un ala.

$$CAM = \frac{2}{S} \int_0^{\frac{b}{2}} c^2 dy \quad (4)$$

En la integral de la ecuación (4), se establece la función de variación del cuadrado de la cuerda, c^2 , a lo largo de la mitad de la envergadura, $\frac{b}{2}$, que depende de la forma particular de cada ala, S es la superficie alar. Como ejemplo, se muestra en la figura (4) el caso de un ala de geometría trapezoidal donde las cuerdas del ala son paralelas al eje x y la envergadura es paralela al eje y .

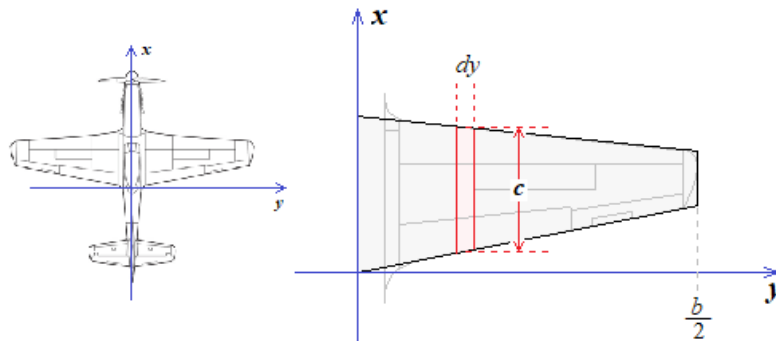


Fig. 4. La longitud de la cuerda c , varía en función de su posición, desde el centro a la punta del ala.

Para demostrar las diferencias que se presentan en los cálculos de algunos parámetros aerodinámicos, los cuales implican al AR, se seleccionaron cinco aviones muy distintos entre sí. En la figura 5 se muestran dichos aviones, a partir de los cuales, se propusieron cinco alas de geometrías muy distintas, con la finalidad de realizar comparaciones, para lo cual, se estableció que todas tuvieran la misma envergadura y superficie alar.

A estas alas se les calcularon sus alargamientos, de la manera convencional y la que se propone aquí, que relaciona a la envergadura, pero ahora entre la *CAM*.

Un criterio para cuantificar cómo podría el alargamiento afectar el funcionamiento aerodinámico de un ala, es calculando su eficiencia o fineza aerodinámica, β , la cual compara la fuerza de sustentación, L , entre su arrastre, D , o en su defecto, comparando sus respectivos coeficientes, C_L y C_D [10].

6

$$\beta = \frac{C_L}{C_D} = \frac{L}{D} \quad (5)$$

Se sabe que el coeficiente de arrastre total es la suma de dos componentes, el inducido, C_{D_i} , [10] y el parásito, C_{D_p} , [8]:

$$C_{D_T} = C_{D_p} + C_{D_i} \quad (6)$$

$$C_{D_i} = \frac{C_L^2}{\pi e AR} \quad (7)$$

$$C_{D_p} = C_{fe} \frac{S_{wet}}{S} \quad (8)$$

Donde e es el factor de eficiencia de Oswald; S_{wet} la superficie *húmeda*, es decir toda la superficie (exterior) del ala en contacto con el viento y C_{fe} el coeficiente de fricción superficial equivalente [8].

$$e = 1.78(1 - 0.045AR^{0.68}) - 0.64 \quad (9)$$

$$e = 4.61(1 - 0.045AR^{0.68})(\cos \Delta_{LE})^{0.15} - 3.1 \quad (10)$$

Para alas con flechado en su borde de ataque, $\Delta_{LE} > 30^\circ$

Por lo tanto, teniendo alas cuyas envergaduras y superficies alares sean iguales, pero con geometrías muy distintas, es posible hacer el ejercicio de calcular las finezas aerodinámicas de cada una, pero en un primer caso, usando el alargamiento calculado con la ecuación (1) y luego con la (2) aquí propuesta y, con ello, hacer una valoración de las diferencias.



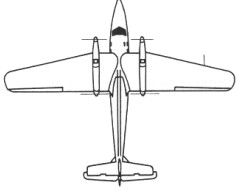
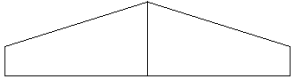

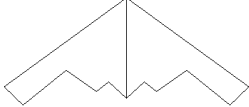
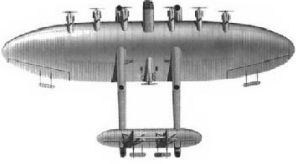


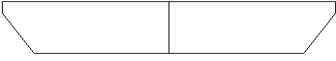
	<p>A. B. <i>Fumigador</i> C. <i>AT-602</i> D. [16]</p>	<p>ALA 1 RECTANGULAR</p> 
	<p>Dornier DO 26 [17]</p>	<p>ALA 2 TRAPEZOIDAL</p> 
	<p>Grumman B-2_Spirit [18]</p>	<p>ALA 3 DELTA COMPUESTA</p> 
	<p>Kalinin K-7 [19]</p>	<p>ALA 4 ELÍPTICA</p> 
	<p>Blohm & Voss BV 222 [20]</p>	<p>ALA 5 RECTA COMPUESTA</p> 

Fig. 5. Ejemplos de aviones con geometrías de alas muy diferentes.

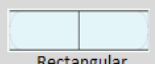




Para la comparación, se asumen otros valores que serán los mismos para las cinco alas, por ejemplo, todas tendrán el mismo perfil aerodinámico, el NACA 0012; un mismo coeficiente de sustentación para la condición de vuelo en crucero, de $C_L = 0.5$; operando en una misión de vuelo de crucero simple; la superficie húmeda, S_{wet} , en cada caso se supondrá de 3.5 veces la superficie alar, y el coeficiente de fricción superficial, será para todas ellas, $C_{fe} = 0.0040$, que es un valor medio de la clasificación según Raymer [8], en su método de arrastre parásito por fricción superficial equivalente.

III. RESULTADOS

La Tabla I resume los resultados de los cálculos realizados para cada ala:

- En la columna C, se presenta el resultado de la CAM calculado con la ecuación (4), para cada ala.
- La columna E, muestra los resultados del alargamiento aplicando las ecuaciones (1) y (2) respectivamente, para cada ala.
- La columna G, muestra el factor de Oswald para cada ala, calculado con las ecuaciones (9) y (10).
- Los coeficientes de arrastre inducido se calcularon con la ecuación (7) y sus resultados se muestran en la columna I. El arrastre parásito, se calculó con la ecuación (8). La suma de estos coeficientes da el resultado del coeficiente de arrastre total mostrado en la columna K.
- Por último, la columna L tiene los resultados de las finezas o eficiencias aerodinámicas de cada ala, calculadas con la ecuación (5).
- Las columnas F, H, J y M, muestran los porcentajes de las diferencias que resultan al calcular los parámetros antes señalados, que dependen y difieren por los dos modos de calcular el alargamiento, por lo cual se tienen dos resultados para cada ala.

TABLA I
CÁLCULO DE LOS ALARGAMIENTOS, POR DIFERENTES MÉTODOS, Y SUS EFECTOS EN OTROS PARÁMETROS RELACIONADOS, EN ALAS DE DIFERENTES GEOMETRÍAS.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Forma del ala	CAM (u)	AR		e		CD _i		CD _T	β		
			Modo de cálculo	Resultado	% Diferencia	Resultado	% Diferencia	Resultado	% diferencia		Resultado	% diferencia
2	 Rectangular	9.071	$b^2/S = 5.780$	0.00	0.8759	0.00	0.0157	0.00	0.0297	16.84	0	
3			$b/CAM = 5.780$									
4			 Trapezoidal									$b^2/S = 5.780$
5	$b/CAM = 5.445$											
6	 Delta compuesta	12.034	$b^2/S = 5.780$	-32.67	0.7103	0.0194	12.22	0.0334	14.97	-7.48		
7			$b/CAM = 4.357$									
8	 Elíptica	9.805	$b^2/S = 5.780$	-8.10	1.0000	0.00	0.0138	7.49	0.0277677	18.01	-3.89	
9			$b/CAM = 5.347$									
10	 Trapezoidal compuesta	9.390	$b^2/S = 5.780$	-3.53	0.8759	0.70	0.0157	3.09	0.0297	16.84	-1.66	
11			$b/CAM = 5.583$									

NOTA 1: Todas las alas tienen la misma superficie y la misma envergadura.

$S = 475.545 \text{ u}^2$
 $b = 52.426 \text{ u}$

$S_{wet} = 1664.41 \text{ u}^2$
 $C_{fe} = 0.004$

$CD_p = 0.014$
 $CL = 0.5$

NOTA 2: El factor e para un ala elíptica se considera = 1, [10].

En el ala de forma rectangular no hay cambios. Ambos métodos de cálculo del alargamiento dan los mismos resultados y por ello no hay afectación en los otros parámetros.

El problema que aquí se analiza, inicia cuando las geometrías de las alas tienen otras formas distintas a la rectangular, argumentando que, conceptualmente, sus relaciones de esbeltez no son exactamente iguales, a pesar de tener las mismas superficies y envergaduras, y esto, muy probablemente se debe a sus distintas formas geométricas.

9

Al menos, así se aprecia en los resultados teóricos de los alargamientos, los factores de Oswald, los coeficientes de arrastre inducido y, de relevancia especial, en las finezas o eficiencias aerodinámicas de cada ala.

A reserva de comentar sobre los otros parámetros, las diferencias en los resultados obtenidos de las finezas o eficiencias aerodinámicas de cada ala, (columna 9 de la tabla 1), se ratifica la tendencia conocida de que las alas de forma elíptica son mejores, [10], seguidas de las trapezoidales. A continuación, las alas de forma rectangular tienen menos eficiencia aerodinámica, pero este aspecto se compensa globalmente al considerar su facilidad de fabricación y bajo costo. Por último, las alas de geometrías más complejas, al menos desde el enfoque de este estudio, son las menos eficientes en su desempeño aerodinámico.

IV. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, se observa que los dos métodos de cálculo del alargamiento aquí presentados arrojan resultados diferentes del alargamiento para las alas que no son rectangulares.

De una mirada a la aviación mundial, es evidente que la mayoría de las alas en los aviones no son de forma rectangular, por ello, el cálculo de otros parámetros aerodinámicos también resultaría ser diferentes, planteando una incertidumbre de cuáles son los más próximos a la realidad.

En opinión de los autores, el método aquí propuesto para el cálculo del alargamiento se considera más adecuado, ya que éste sí toma en cuenta la forma geométrica particular de cada ala.

Se considera importante continuar con esta investigación, destacando la relevancia que tienen las formas geométricas que pueden tener las alas y que, gracias a los constantes avances tecnológicos de manufactura, como la impresión en 3D, para llevar a la realidad formas de alas más complejas, y suponiendo con ello la posibilidad de lograr un incremento de su eficiencia aerodinámica, sin afectar su factibilidad económica.

Por lo tanto, éste trabajo plantea un punto de partida para continuarlo en dos líneas de estudio: una a través del cálculo CFD o dinámica computacional de fluidos, y la otra, de pruebas en túnel de viento con modelos a escala de alas fabricadas con los recursos disponibles de manufactura en 3D, y los medios disponibles para su estudio práctico en los laboratorios del Instituto Politécnico Nacional.

REFERENCIAS

- [1] N. A. V. Piercy, *Aerodynamics*, 2ª ed., Londres, UK, T. E. Universities LTD, 1947.
- [2] J. Winchester. "Albatross D.III 1916". Virtual Aircraft Museum. Accessed: May, 2023. [Online] Available: http://www.aviastar.org/air/germany/albatros_d-3.php
- [3] Etsy. "Supermarine Spitfire MkI". Etsy.com. Accessed: May, 2023 [Online] Available: <https://www.etsy.com/mx/listing/852960879/supermarine-spitfire-mki-3-view-dibujo>

- [4] Wikipedia. “North American P-51 Mustang”. Wikipedia. Accessed: May, 2023 [Online] Available: https://es.wikipedia.org/wiki/North_American_P-51_Mustang#
- [5] C. Ordoñez Romero, *Aerodinámica Tomo 2*, 1ª ed. México, UTEHA, 1979.
- [6] H. Ashley, *Landahl. Aerodynamics of Wings and Bodies*, 1ª ed. Massachusetts, USA, A/W Publishing Company, 1965.
- [7] R. F. Anderson, *Determination of the characteristics of the tapered wings*, Report No. 572, NACA, USA, 1936.
- [8] D. P. Raymer, *Aircraft design: a conceptual approach*, Washington DC, USA, AIAA Education Series, 1989.
- [9] T. V. Karman, *Aerodynamics*, 1ª ed. New York, USA, McGraw-Hill, 1963.
- [10] J. D. Anderson Jr., *Fundamentals of Aerodynamics*. 3a ed. McGraw-Hill. Maryland, U.S.A. 2001.
- [11] J. Roskam, E. Lan, *Airplane Aerodynamics and performance*. DarCorporation. Kansas, U.S.A. 1997
- [12] H. Abbott, *Theory of Wing Sections*, New York, USA, Dover Publications, 1959.
- [13] B. W. McCormick, *Aerodynamics, Aeronautics and Performance*, New York, USA, John Willey & Sons, 1979.
- [14] J. D. Anderson Jr., *Aircraft Performance and Design*, New York, USA, Mc Graw Hill, 1999.
- [15] J. A. Correa, T. Fernández, A. Mejía, ¿CAM o CGM en un avión? Origen, realidad y uso en la práctica. *XVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*. Guanajuato, México, septiembre 2012.
- [16] J. A. Correa, T. Fernández, J. Sandoval, A. Mejía, V. Sauce, A. Mosqueda, “Determinación de la Cuerda Aerodinámica Media, convenida como la longitud característica en un avión de ala fija,” *South Florida Journal of Development*. Vol. 4, no. 10, 2023, doi <https://doi.org/10.46932/sfjdv4n10-008>
- [17] Air Tractor Inc. “Fumigador AT-602”. AirTractor. Accessed: May, 2023. [Online] Available: <https://airtractor.com/es/aircraft/at-602/>
- [18] Enciclopedia libre. “Dornier Do 26”. Enciclopedia libre. Accessed: May, 2023. [Online] Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Dornier_Do_26
- [19] Enciclopedia libre. “Northrop Grumman B-2 Spirit”. Enciclopedia libre. Accessed: May, 2023. [Online] Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_B-2_Spirit
- [20] Enciclopedia libre. “Kalinin K-7”. Enciclopedia libre. Accessed: May, 2023. [Online] Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Kalinin_K-7
- [21] GrabCad Community. “Blohm und Voss BV 222C Viking”. GrabCad. Accessed: May, 2023. [Online] Available: <https://grabcad.com/library/blohm-voss-bv-222-1>