

¿POR QUE VUELAN LOS AVIONES?

Una descripción física de la sustentación

Autores :

David Anderson es Físico del Fermi National Accelerator Laboratory USA

&

Scott Eberhardt es Associate Profesor in Aeronautics and Astronautics de la University of Washington USA

Ambos son entusiastas pilotos civiles

Resumen, adaptación y traducción: Fernando Gunckel

Una pregunta que a menudo escuchamos los pilotos es.

“¿Porque vuelan los aviones?” la respuesta que se obtiene normalmente es inexacta o, lo que es peor, completamente errada.

Lo que se explicara a continuación es que es más fácil de entender la sustentación, si uno comienza con las leyes de Newton, que con el principio de Bernoulli, y que las explicaciones populares a las que estamos acostumbrados, están equivocadas, siendo la desviación hacia abajo de la masa de aire, el origen de la sustentación.

Para empezar, analizaremos las tres definiciones de sustentación comúnmente usadas en textos y manuales de instrucción de aerodinámica. La primera a la que llamaremos Definición matemática de la aerodinámica es usada por ingenieros aeronáuticos. Esta definición utiliza matemáticas complejas y/o simulaciones computacionales para calcular la sustentación que genera un ala.

La segunda es la Explicación popular, que esta basada en el principio de Bernoulli. La principal ventaja de esta definicion, es lo fácil que es de entender. Por su simplicidad es usada habitualmente para describir el origen de la sustentación en los manuales de vuelo. La mayor desventaja es que esta basada en el supuesto del “ principio del transito en tiempo equivalente “ que supone que tanto el flujo de aire que circula por la cara superior del ala como la que lo hace por la cara inferior, se encuentran en el borde de fuga al mismo tiempo, lo cual esta demostrado que es incorrecto. Esta definición se centra en la forma del ala, dejando de lado importantes fenómenos como son el vuelo invertido, la potencia, el efecto suelo y la relación de la sustentación con el ángulo de ataque del ala.

La tercera definición a la cual no abocaremos aquí, la llamaremos Definición física de la sustentación. Esta definición esta basada primariamente en las leyes de Newton. La definición física es útil para entender el vuelo y es fácil de comprender por todos los interesados sin estudios específicos en el tema. Muy pocas matemáticas son necesarias para entender los fenómenos asociados al vuelo. La definición física nos da una clara e intuitiva forma de entender los fenómenos asociados a la sustentación como son, la curva de potencia, el efecto suelo, el stall de alta velocidad, etc. Sin embargo, a diferencia de la definición matemática de la aerodinámica, la definición física no tiene capacidades de diseño o simulación.

Explicación popular de la sustentación

A los estudiantes de física y aerodinámica se les enseña, que los aviones vuelan como resultado del principio de Bernoulli, que dice, que si la velocidad del aire aumenta, la presión de este disminuye. Por esto un ala genera sustentación dado que el aire circula a mayor velocidad por su cara superior, creando una zona de baja presión, lo cual por equilibrio de presiones da como resultado la sustentación. Esta explicación usualmente satisface la curiosidad de la mayoría, solo unos pocos

discuten esta conclusión. Algunos se preguntan, ¿por que el aire circula por la parte de arriba de ala más rápido?, Es aquí donde la explicación popular de la sustentación empieza a desmoronarse.

Para explicar porque sucede esto, se recurre al argumento geométrico, que la distancia que recorre el aire esta directamente relacionada con la velocidad.

La explicación que se usa habitualmente es, que cuando el aire se divide al impactar el borde de ataque del ala, separándose en un flujo que avanza por la cara superior y otro que lo hace por la cara inferior, deben converger en el borde de fuga al mismo tiempo. Esto es lo que se denomina "principio del transito en tiempo equivalente".

Asumiendo que esta idea fuese correcta, la velocidad promedio del aire sobre y bajo el ala, que se puede determinar fácilmente, porque podemos medir la distancia y luego podemos calcular la velocidad mediante el principio de Bernoulli, podemos determinar las fuerzas de presión y así la sustentación. Si hacemos un simple calculo, encontraremos que en orden de generar la sustentación requerida para un típico avión pequeño, la longitud de la cara superior del ala debiera ser, cerca de 50% mas larga que la cara inferior, en la figura 1 vemos como se vería un perfil de ala que cumple esa condición.

Por un momento imaginemos como se verían las alas de un Boeing 747!!

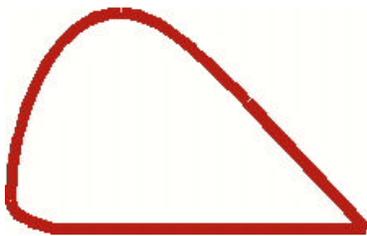


FIGURA 1 Perfil

Si vemos un ala de un típico avión pequeño, que tiene una cara superior que es 1.5 – 2.5 % mas larga que la cara inferior, podemos calcular que un Cessna 172 necesitaría volar a 400 nudos, para generar la sustentación suficiente.

Claramente algo en esta definición de sustentación no concuerda con la realidad.

Pero, quien dice que el aire que choca con el borde de ataque del ala y se divide en una parte que circula por la cara superior y otra por la cara inferior, deban encontrarse en el borde de fuga al mismo tiempo? .La figura 2 muestra el flujo de aire sobre un ala, en un túnel de viento simulado. En la simulación, humo coloreado es introducido en forma periódica. Podemos ver que el aire que circula por la cara superior del ala llega al borde de fuga considerablemente antes que el que lo hace por la cara inferior de esta. De hecho una inspección acuciosa muestra que el aire que circula por la cara inferior del ala, fluye en forma más lenta que el viento relativo. Esto comienza a ser demasiado para el principio de transito en tiempo equivalente.

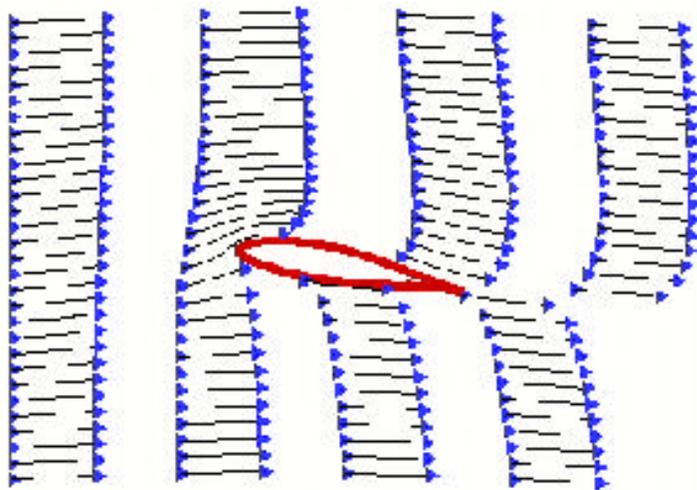


FIGURA2 Flujo simulado aire

La explicación popular implica que el vuelo invertido es imposible. Esto ciertamente no explica el vuelo de aviones acrobáticos, con alas con perfil simétrico, o como un ala se ajusta a los grandes cambios de carga como en la recuperación de una picada o en un viraje escarpado.

Nos preguntamos, ¿por qué la explicación popular ha prevalecido por tanto tiempo? Una respuesta es que el principio de Bernoulli es fácil de entender. No hay nada malo en el principio de Bernoulli, o de la definición, que el flujo de aire por la parte superior del ala circula más rápido. Pero, como sugiere el análisis, nuestro entendimiento no se completa con esta explicación. El problema es que estamos perdiendo una pieza vital, cuando solo aplicamos el principio de Bernoulli. Podemos calcular la presión de aire alrededor del ala, si sabemos la velocidad del aire por las caras inferior y superior del ala, pero ¿cómo determinamos esta velocidad?

Otro atajo fundamental de la explicación popular es que ignora el trabajo realizado. La sustentación requiere potencia (que es trabajo por tiempo), como veremos más tarde el entendimiento de potencia es clave para entender muchos de los fenómenos de la sustentación.

Leyes de Newton y la sustentación

¿Cómo un ala genera sustentación?. Para empezar a entender lo que es la sustentación debemos revisar la primera y tercera ley de Newton (luego veremos la segunda). La primera ley de Newton dice que –Un cuerpo en reposo tratara de mantenerse en reposo, un cuerpo en movimiento se mantendrá sin cambiar su condición, hasta que se le aplique una fuerza externa sobre él. Esto significa que si uno ve una deformación en el flujo de la masa de aire, o si una masa de aire originalmente en reposo es puesta en movimiento, quiere decir que hay una fuerza actuando sobre ella. La tercera ley de Newton dice que a toda acción existe una reacción igual y opuesta. Para lograr generar sustentación una ala debe hacer algo a la masa de aire. Lo que el ala hace a la masa de aire es la acción mientras que la sustentación es la reacción.

Comparemos las dos figuras siguientes que muestran los flujos de aire alrededor del ala en la figura 3 el flujo del aire llega en forma recta al ala se desplaza alrededor del ala, una parte por arriba y otra por abajo, para salir por la parte posterior en la misma forma que llego. Todos nosotros hemos visto anteriormente esquemas similares, incluso en manuales de aerodinámica. Pero el flujo de aire deja el ala de la misma forma como estaba antes. No hubo una acción específica en el flujo de aire dado esto no puede haber sustentación, la figura 4 muestra el flujo de aire como debe ser dibujado. El flujo de aire pasa por la parte superior del ala y es desviado hacia abajo. El desvío del aire es la acción. La reacción es la sustentación producida por el ala. El aire que sube en la parte delantera del ala lo llamaremos “upwash” y el que desciende por la parte posterior del ala lo llamaremos “downwash”.

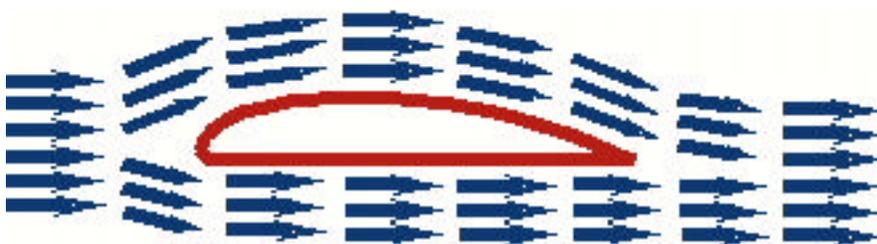


FIGURA 3 Descripción del flujo de aire sobre un ala

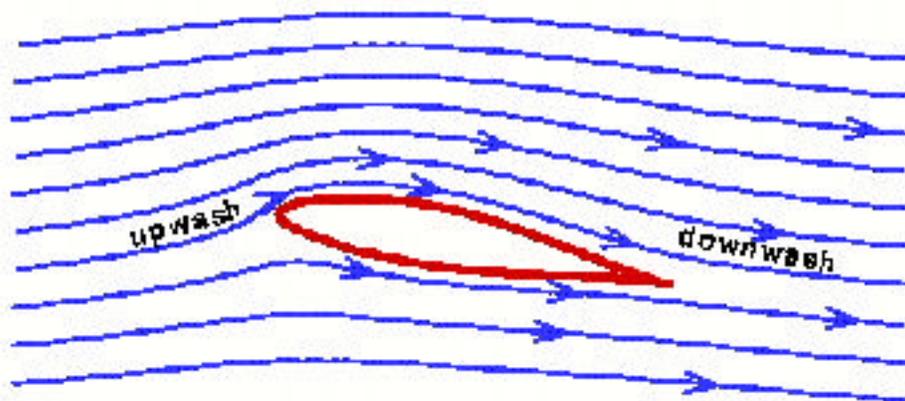


FIGURA 4 El flujo de aire en un ala mostrando “upwash” y “downwash”

El ala como una bomba

Como las leyes de Newton sugieren, el ala debe cambiar algo en la masa de aire, para obtener sustentación. Cambios en el momento del aire resultan en fuerzas sobre el ala. Para generar sustentación el ala debe dirigir aire hacia abajo, mucho aire!.

La sustentación de un ala es igual al cambio de momento del aire dirigiéndolo hacia abajo. La sustentación de un ala es proporcional a la cantidad de aire desviado hacia abajo por la velocidad de descenso del aire. Es tan simple.

Para conseguir mas sustentación el ala debe desviar una mayor cantidad de aire o aumentar su velocidad hacia abajo. Este flujo de aire dirigido hacia abajo es llamado “downwash” en la Figura 5. Podemos ver como el downwash se ve en el túnel de viento. Mientras mayor es el ángulo de ataque mayor será la velocidad vertical de la masa de aire, manteniendo el ángulo de ataque, pero aumentando la velocidad del ala también se lograra un aumento de la sustentación. El vector de sustentación del ala aumentara con el aumento de la velocidad del ala, así como el aumento del downwash.

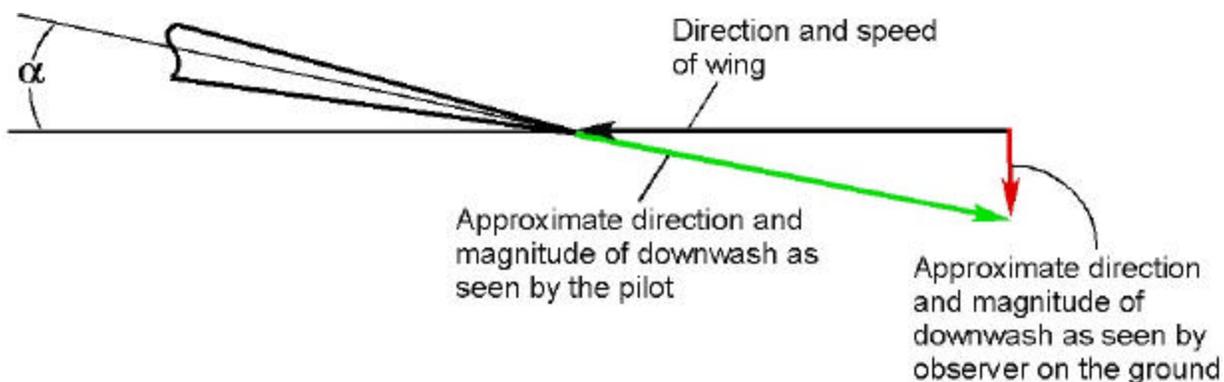


FIGURA 5 Gráfico de descomposición de fuerzas



FIGURA 6 Muestra el downwash y los vortices de punta de ala sobre la niebla.
(Photo Paul Bowen, Courtesy of Cessna Aircraft Co.)

Esto puede ser demostrado observando el denso flujo de aire que desplaza una hélice en movimiento, un ventilador o, bajo el rotor de un helicóptero, todos Los cuales son alas que giran. Si el flujo de aire saliese de la hélice en un ángulo el flujo de la hélice tendría una forma cónica y no una sólida columna. Si un avión volara sobre una gran pesa, esta pesa registraría el peso completo del avión.

Si estimamos la componente vertical promedio de downwash de un avión Cessna 172, volando a 110 nudos, debe ser de aproximadamente 9 nudos, luego para generar Los 1000 kilos de sustentación el ala debe bombear la increíble cantidad de 2.5 toneladas por segundo de aire !!! .De hecho, como discutiremos mas adelante, este estimado puede estar subestimado y puede ser bastante mayor. La cantidad de aire que hay que bombear hacia abajo, para un avión Boeing 747, para crear la sustentación necesaria para levantar sus 400 toneladas de peso de despegue, resulta a todas luces increíble.

Bombeando, o dirigiendo una cantidad de aire tan grande hacia abajo, es un gran argumento en contra de la sustentación generada solo como un efecto de superficie, como esta implícita en la explicación popular, basada en el principio de Bernoulli. De hecho para poder bombear 2.5 ton/seg. El ala del Cessna 172 debe acelerar todo el aire sobre el ala, hasta aproximadamente 3 mts por sobre ella.

¿Cómo puede un ala tan delgada desviar hacia abajo un flujo de aire tan grande?

Cuando el flujo de aire es desviado por sobre la cara superior del ala, esta arrastra la masa de aire que se encuentra sobre esta, desviándola hacia abajo tambien. Este arrastre reduce la presión de aire sobre el ala. Es la aceleración del aire por sobre el ala con dirección hacia abajo la que produce la sustentación. ¿Cómo el ala desvía la masa de aire con suficiente fuerza para generar sustentación?, Lo veremos mas adelante.

Un observador ubicado en el suelo, vería el flujo de aire saliendo del ala en forma casi vertical. Pero ¿qué está haciendo el flujo de aire arriba y abajo del ala? , La figura 7 muestra una instantánea de cómo las moléculas de aire se mueven alrededor del ala, cuando esta está en desplazamiento. Recordemos que el aire inicialmente está quieto y es el ala la que se desplaza. Adelante del borde de ataque, el aire se desplaza hacia arriba (upwash). En el borde de fuga el aire es dirigido hacia abajo (downwash). Sobre el ala el aire es acelerado hacia el borde de fuga. Abajo del ala el aire es acelerado hacia adelante ligeramente si es que no queda como estaba.

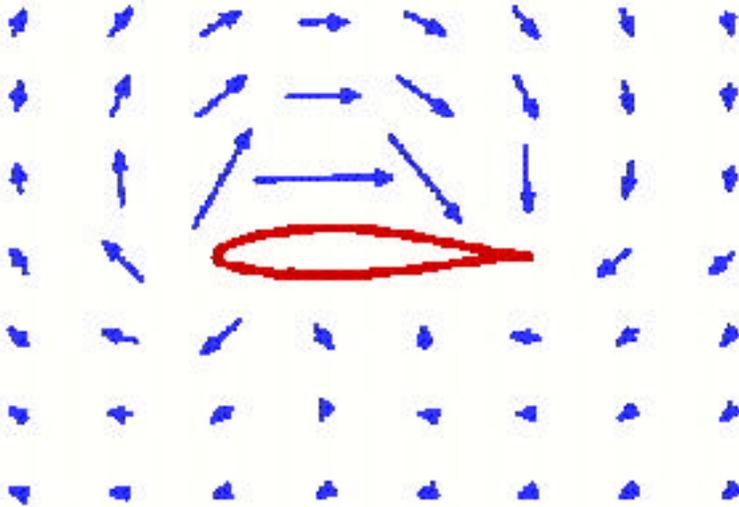


FIGURA 7 Movimiento del aire alrededor de un ala en movimiento

En la definición matemática de la sustentación aerodinámica, esta rotación del aire alrededor del ala, da como resultado los modelos de estudio matemático de compleja manipulación y difícil entendimiento para los no expertos en el tema. Observando la figura 7 podemos determinar que la cara superior del ala tiene mucho más que ver con el movimiento del aire que la cara inferior. Luego la cara superior del ala es la superficie más crítica. Por esto los aviones militares que llevan cargas externas en las alas, lo hacen por la cara inferior de esta, tales como estanques lanzables, bombas, misiles, etc., pero no en la cara superior, donde interferirían con la sustentación. Por esto los montantes y otras estructuras de refuerzos de las alas normalmente van por la cara inferior del ala, históricamente es raro encontrar estos elementos ubicados en la cara superior del ala. Cualquier elemento colocado en la cara superior del ala interfiere con la sustentación.

El aire tiene viscosidad

La pregunta natural que surge es “como el ala desvía aire hacia abajo”. Cuando un fluido en movimiento, como el aire y el agua, toma contacto con una superficie curva, estos tratarán de seguir esa superficie. Para demostrar este efecto pueden probar sosteniendo un vaso en forma horizontal bajo un chorro de agua vertical, al acercarlo al chorro de agua, tan solo al primer contacto el agua en vez de continuar cayendo en forma vertical se adherirá al vaso y lo seguirá, como se indica en la figura 8. Esta tendencia de los fluidos de seguir las superficies curvas es conocido como efecto Coanda. Desde la primera ley de Newton sabemos que para que un fluido se desvíe, debe haber una fuerza actuando sobre él. De la tercera ley de Newton sabemos que este fluido deberá aplicar una fuerza igual y opuesta en el objeto que causa que el fluido se desvíe.

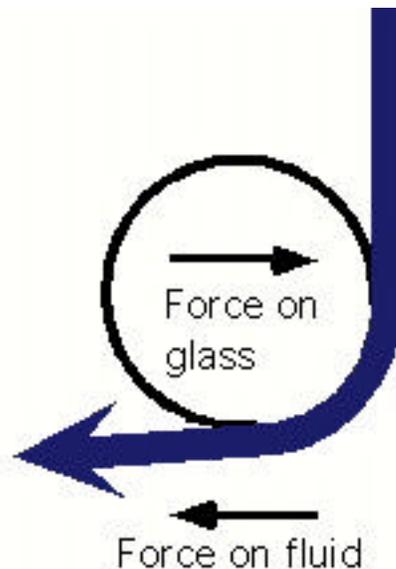


FIGURA 8 Efecto Coanda

¿Por que un fluido sigue una superficie curva? La respuesta es viscosidad, la resistencia para fluir que también les da una capacidad “pegajosa”. La viscosidad en el aire es muy pequeña pero suficiente como para que las moléculas del aire deseen adherirse a la superficie. La velocidad relativa entre la superficie y las moléculas de aire más cercanas es exactamente cero. (Por esto que en los autos la capa de polvo en contacto con su superficie no se desprende al circular). Justo sobre la superficie, el fluido tiene una pequeña velocidad. Mientras más nos alejamos de la superficie, va aumentando la velocidad del fluido, hasta que se llega a la velocidad del viento relativo. (Esto ocurre en cerca de 2 cm.). Como el fluido cercano a la superficie, tiene un cambio en la velocidad, el fluido es desviado hacia la superficie. Salvo que el desvío sea muy pronunciado, el fluido seguirá la superficie. Este volumen de aire alrededor de las alas, que aparece parcialmente adherida, es llamada “capa límite” habitualmente en los manuales de aerodinámica.

Sustentación como función del ángulo de ataque.

Hay muchos tipos de perfiles de alas: convencional, simétrica, supercrítica, las alas de biplanos antiguos que parecían tableros curvados, etc. En todos los casos, el ala fuerza el flujo de aire hacia abajo. , o más precisamente, empujan aire hacia abajo proveniente desde la cara superior de esta. Lo que todas las alas tienen en común, es el ángulo de ataque con respecto al viento relativo. Es el ángulo de ataque, el primer parámetro en determinar la sustentación. La sustentación producida por un ala invertida, se puede explicar por su ángulo de ataque, aun con la aparente contradicción, con la explicación popular que involucra el principio de Bernoulli. Un piloto ajusta el ángulo de ataque, para ajustar la sustentación para la velocidad y carga correspondiente. La explicación popular de la sustentación, que se enfoca en la forma del perfil del ala, le da al piloto solamente el ajuste de la velocidad, para controlar la cantidad de sustentación buscada.

Para entender mejor el Rol del ángulo de ataque, es útil introducir un ángulo de ataque “efectivo” definido como, el ángulo del ala con respecto al viento relativo, con el cual se obtiene sustentación nula, este es definido como cero grados. Si uno luego cambia el ángulo de ataque, hacia arriba o hacia abajo encontraremos que la sustentación es proporcional al ángulo. La figura 9 muestra el coeficiente de sustentación (la sustentación normalizada para el tamaño del ala) para una ala típica, como función del ángulo de ataque efectivo. Una relación similar entre sustentación y ángulo de ataque se encuentra para todo tipo de alas, independientemente de su diseño. Esto es verdadero para la ala de un Boeing 747 o un avión de papel. El Rol

del ángulo de ataque es más importante, que la forma del perfil del ala, en el entendimiento de la sustentación.

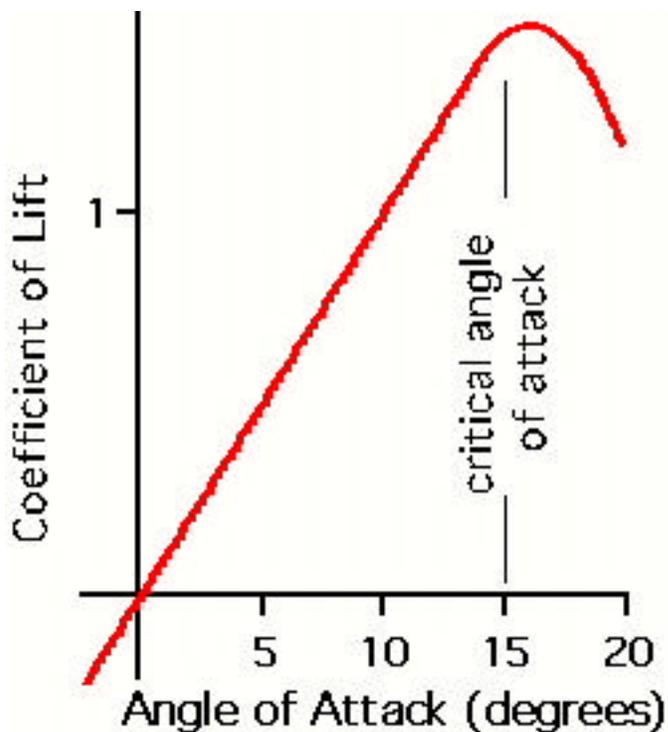


FIGURA 9 Coeficiente de sustentación versus ángulo de ataque

Típicamente, la sustentación comienza a decrecer a un ángulo de ataque de aproximadamente 15 grados. Las fuerzas necesarias para desviar el aire en un ángulo mayor son mayores que la viscosidad que el aire puede soportar, luego, el aire comienza a separarse del ala. Esta separación del flujo del aire, de la cara superior del ala es llamado "stall".

El ala como un resbalin

Introduciremos ahora una nueva imagen mental de un ala. Uno esta acostumbrado a pensar que el ala es como una delgada cuchilla, que corta el aire generando la sustentación, como un acto de magia. La nueva imagen que proponemos que adopte, es la de un ala que se comporta como un resbalin que desvía una cierta cantidad de aire desde la horizontal hasta un ángulo correspondiente al ángulo de ataque del ala, como lo indica la figura 10 El resbalin puede ser graficado como una estructura invisible instalada sobre el ala en la fabrica del ala. El largo del resbalin es la misma del ala, la altura de instalación similar a la cuerda del ala (equivale a la distancia desde el borde de ataque hasta el borde de fuga) la cantidad de aire interceptado por el resbalin es proporcional a la velocidad del avión y la densidad del aire, nada más.

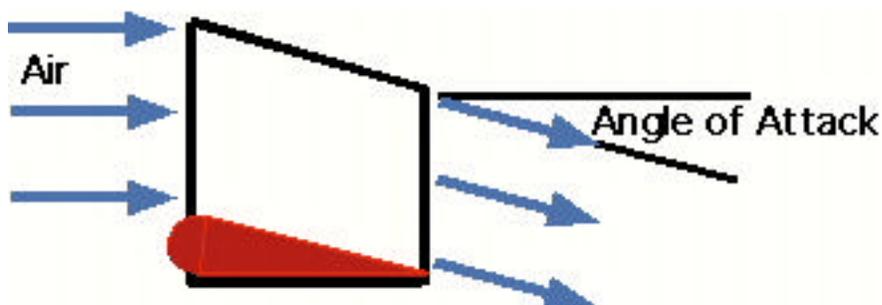


FIGURA 10 El ala como un resbalin

Como indicamos anteriormente, la sustentación del ala es proporcional a la cantidad de aire desviado hacia abajo por la velocidad vertical de ese aire. Cuando un avión aumenta su velocidad el resbalin desvía mas aire. Como la carga en el ala, que es el peso del aire, no incrementa la velocidad vertical del aire desviado, debe ser disminuido en forma proporcional. Por esto el ángulo de ataque es reducido para mantener la sustentación constante. Cuando el avión vuela mas alto, el aire es menos denso luego el resbalin desvía menos aire para la misma velocidad, luego para compensar esta situación el ángulo de ataque debe ser aumentado. El concepto de este capitulo será usado para entender la sustentación, en una forma imposible de entender, con la explicación popular.

La sustentación requiere potencia

Cuando un avión pasa sobre nosotros el aire que estaba quieto, termina con un movimiento hacia abajo. Esto es, el aire es dejado en movimiento después del paso del avión. Se le ha dado energía al aire. Potencia es energía, o trabajo por tiempo. Luego, sustentación requiere potencia. Esta potencia es producida por el motor del avión(o la gravedad y las térmicas para los planeadores).

¿Cuanta energía necesitamos para volar? La potencia necesaria para que el avión se sustente, es proporcional a la carga(o peso) por la velocidad vertical del aire. Si la velocidad del avión aumenta al doble, el aire desviado hacia abajo se duplica. El ángulo de ataque debe ser reducido para que obtener una velocidad vertical que es la mitad de la original para obtener la misma sustentacion. La potencia requerida para obtener la sustentación ahora es la mitad de la original. Esto demuestra que la potencia requerida para obtener la sustentación disminuye, al aumentar el avión de velocidad. En efecto podemos demostrar que esta potencia, para crear sustentación es proporcional a la velocidad del avión.

Pero, todos sabemos que para volar más rápido (en crucero) debemos aplicar mas potencia. Necesitamos mas potencia que la potencia necesaria para producir sustentacion. La potencia asociada con la sustentación descrita arriba, es a menudo llamada resistencia "inducida". Potencia es necesaria también para vencer la llamada resistencia "parásita", que es la resistencia producida por las antenas, tren de aterrizaje fijo, montantes, etc. al desplazarse a traves del aire.

La figura 11 muestra las curvas de resistencia, para resistencia inducida, resistencia parásita y la curva que representa la suma de ambas, o sea la resistencia total. A baja velocidad la resistencia inducida domina, mientras más lento se vuela menos aire es desviado hacia abajo y por esto se debe aumentar el ángulo de ataque para mantener la sustentación requerida. Los pilotos practican volar cerca de la zona de comando reverso, para reconocer que el ángulo de ataque y la potencia que se requiere para volar a velocidades muy bajas es considerable.

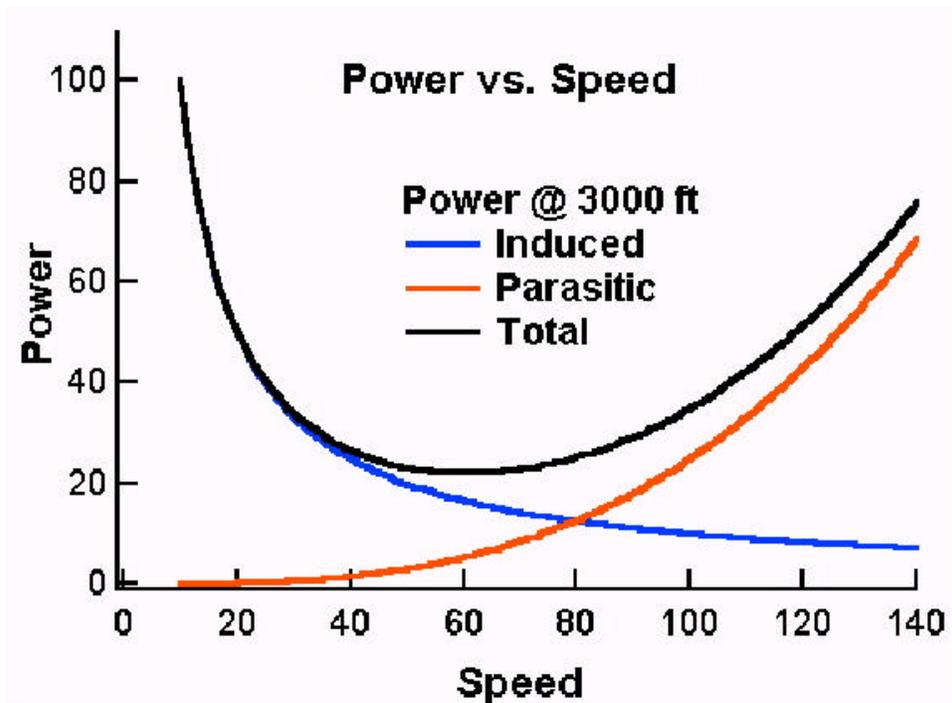


FIGURA 11 Potencia requerida versus velocidad

En crucero, la potencia requerida es dominada por la resistencia parásita, podemos tener en el avión un motor más potente, pero este servirá para poder montar más rápido, pero poco ayudara para mejorar la velocidad de crucero del avión.

Ahora que sabemos como varían los requerimientos de potencia con respecto a la velocidad, podemos por lo tanto entender lo que es la resistencia al avance, es una fuerza. La figura 12 muestra la resistencia inducida, parásita y total en función de la velocidad. Echando un vistazo a estas curvas uno puede deducir algunas cosas, de cómo se diseñan los aviones. Los aviones más lentos, como los planeadores son diseñados minimizando la resistencia inducida, que domina a bajas velocidades, los aviones rápidos se preocupan mas de la resistencia parásita.

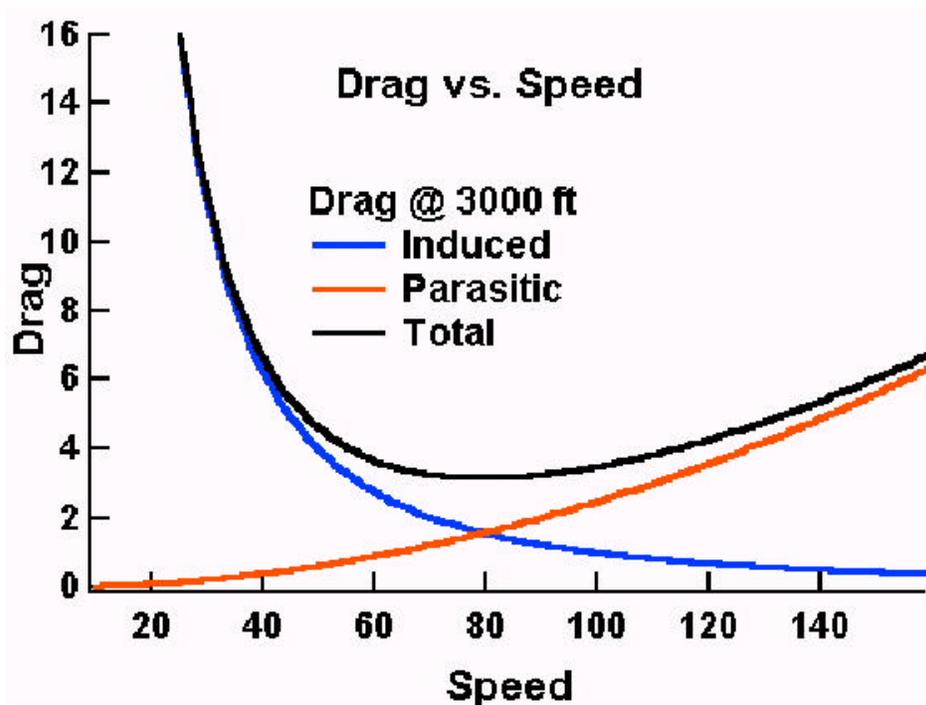


FIGURA 12 Resistencia versus velocidad

Eficiencia del ala

En crucero, una respetable cantidad de resistencia al avance de las alas modernas es la resistencia inducida. La resistencia parásita domina en crucero, la resistencia parásita de un ala de Boeing 747, es solamente equivalente a la de un cable de 1 cm. de diámetro de la misma envergadura. Uno podría preguntarse que afecta la eficiencia del ala?. Podemos ver que la resistencia inducida es proporcional a la velocidad vertical del aire. Si el largo del ala es duplicado, el largo del resbalin también se duplica, desviando el doble de aire. Luego para obtener la misma sustentación, la velocidad vertical(y el ángulo de ataque)debe disminuirse a la mitad. Como la resistencia inducida es proporcional a la velocidad vertical del aire, ella también es reducida a la mitad. Luego la eficiencia de producir sustentación por parte del ala es proporcional al largo del ala. Mientras más larga el ala es menor la resistencia inducida para producir la misma sustentacion, piensen que esto se logra con un aumento de la resistencia parásita. Los aviones más lentos son mas afectados por la resistencia inducida que los aviones más rápidos, por esto tienen las alas más largas. Los planeadores, que vuelan a velocidades mas bajas, tienen sus alas muy largas. Los rapidísimos aviones de combate, por otro lado, sienten mas los efectos de la resistencia parásita que los aviones lentos. Por esto los aviones más rápidos tienen alas de poca envergadura, para disminuir la resistencia parásita.

Existe un error de concepto, de algunos que piensan que la sustentación no requiere de potencia. Esto viene de estudios aerodinámicos de la teoría de perfiles ideales de alas

La idea es que un ala de envergadura infinita, (como vimos que la potencia requerida para generar sustentación es inversamente proporcional al largo del ala). No requeriría potencia para producir sustentación. Si esto fuera correcto, los aviones tendría la misma autonomía con o sin carga, y los helicópteros podrían elevarse a cualquier altitud y carga, lo mejor de todo, las hélices (que son alas rotatorias) no necesitarían potencia para producir traccion. Desgraciadamente, vivimos en el mundo real, en el cual tanto la sustentación como la propulsión requieren de potencia.

Potencia y carga alar

Consideremos ahora la relación entre carga alar y potencia. ¿Se necesita mas potencia para volar con mas pasajeros y carga?. Y, el aumento de carga en un avión ¿afecta su velocidad de "stall"?. A una velocidad constante, si la carga alar es aumentada la velocidad vertical debe ser incrementada para compensar la falta de sustentacion. Esto es hecho incrementando el ángulo de ataque. Si el peso total del avión aumenta al doble, como en un viraje de 60 grados (2g), la velocidad vertical del aire es duplicada para compensar el aumento en la carga alar, ambos se han duplicado. La resistencia inducida requerida ha aumentado mas, cuatro veces!. Lo mismo será verdadero si el peso del avión se duplica cargando combustible, etc.

Una manera de medir la potencia total utilizada, es mirando el flujo del consumo de combustible. La figura 13 muestra el consumo de combustible, versus el peso total en un avión de transporte pesado a una velocidad constante. Como la velocidad es constante el cambio en el consumo de combustible es producida por el cambio en la resistencia inducida.

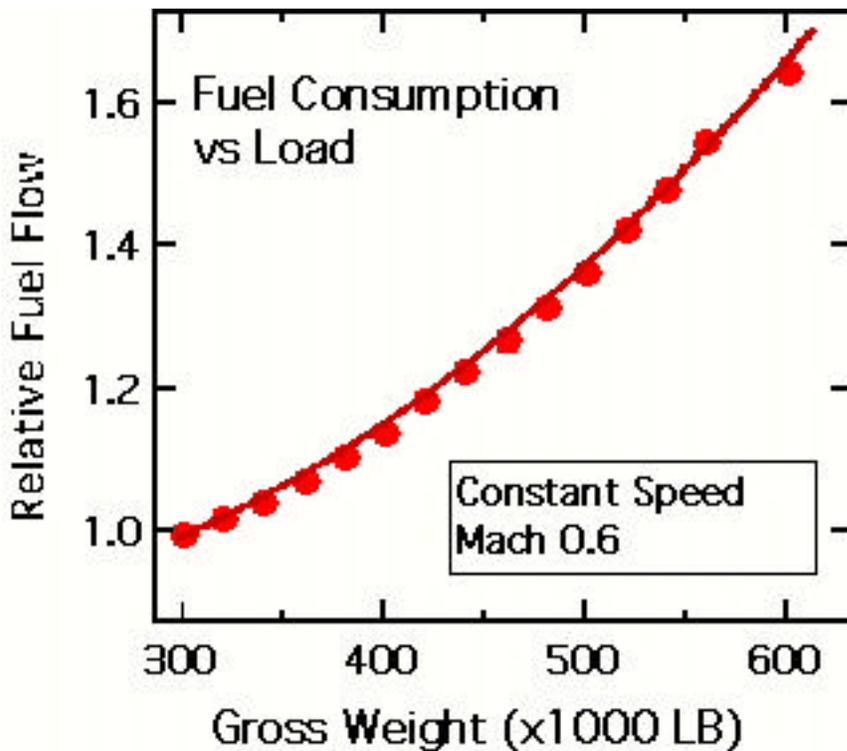


FIGURA 13 Consumo de combustible versus carga para un avión de transporte pesado a velocidad constante

El aumento en el ángulo de ataque, con aumento en la carga, tiene otro lado negativo a parte del aumento de potencia. Como se muestra en la figura 9 un ala eventualmente puede caer en stall, cuando el flujo de aire sea incapaz de seguir la cara superior del ala. Esto es cuando se alcanza el ángulo de ataque crítico. La figura 14 muestra el ángulo de ataque como función de la velocidad para una carga alar dada, y para un viraje con carga de 2g. El ángulo de ataque en el cual el ala cae en stall es constante y no es función de la carga alar. Al aumentar la carga en un viraje de 2g aumenta la velocidad en la cual el ala cae en stall en un 40%. Un aumento de altitud aumentara el ángulo de ataque en un viraje de 2g. Por esto es que algunos pilotos practican "stall de alta velocidad" que demuestra que un avión puede caer en stall a cualquier velocidad. Para toda velocidad existe una carga alar que le inducirá el stall.

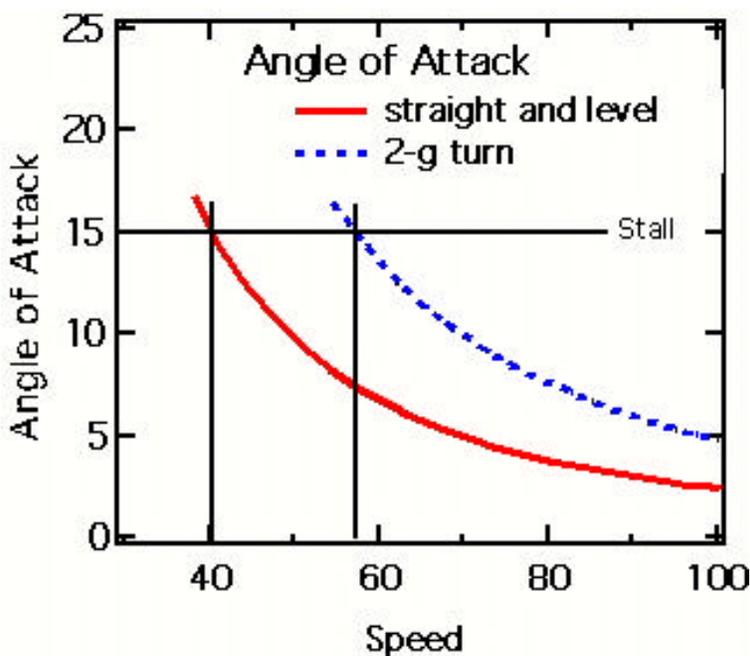


FIGURA 14 Angulo de ataque versus velocidad para vuelo recto y nivelado, y para un viraje de 60 grados (2g)

Vórtices de punta de ala

Uno puede preguntarse como se vera el downwash en un ala. El downwash sale del ala como una lamina y se relaciona con la distribución de la carga alar. La distribución de la carga alar cambia desde la raíz de esta hacia la punta de esta. Luego la cantidad de downwash deberá, en esa misma proporción disminuir a través del ala. El ala desvía un flujo mayor de aire en la raíz que en la punta de esta. Como la raíz del ala desvía hacia abajo una mayor cantidad de aire que la que se desvía en las zonas más cercanas a la punta del ala, esta comienza a curvarse hacia fuera sobre si misma, como el flujo de aire se curva alrededor de la cara superior del ala, por el cambio en la velocidad en el flujo de este aire. Estos son los vórtices de punta de ala. La fuerza que puede llegar a tener estos vórtices es proporcional a la tasa de cambio de la sustentación, a lo largo del ala. Al acercarnos a la punta del ala la sustentación disminuye rápidamente a hasta llegar a cero, causando el vórtice más severo. Este es el vórtice de punta de ala, es solo una pequeña parte del vórtice del ala(aun cuando normalmente es el que más notamos).

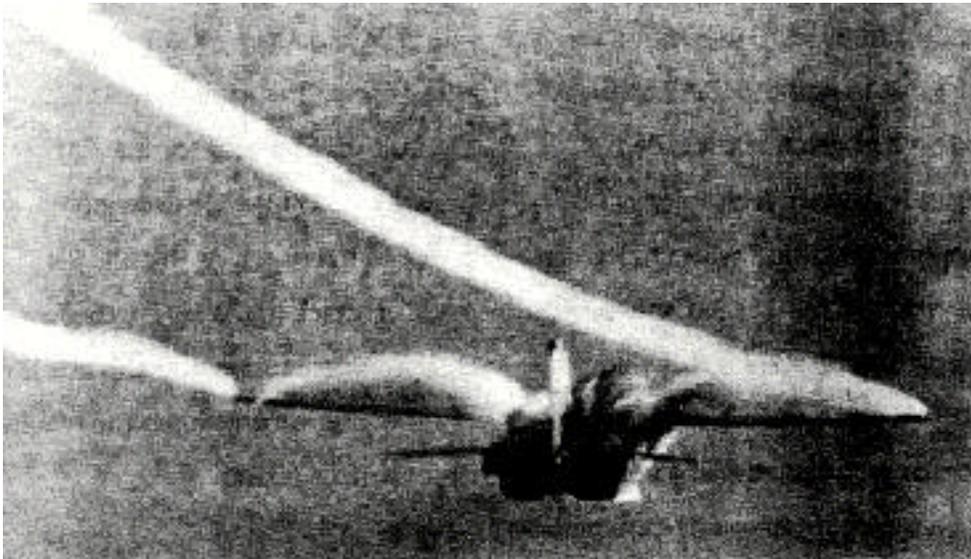


FIGURA 15 La condensacion nos muestra la distribución de la sustentacion a lo largo del ala. Tambien se pueden ver los vortices de punta de ala.

(From "Patterns in the Sky," J.F. Campbell and J.R. Chambers, NASA SP-514)

Los "winglets" "pequeñas alas, casi verticales en las puntas de las alas de algunos aviones modernos, se utilizan para aumentar la eficiencia del ala, aumentando su largo efectivo. La sustentación de un ala normal debe llegar a cero, en la punta del ala, porque la cara superior y la inferior se comunican en la punta. Los winglets bloquean esta comunicación por lo que la sustentación del ala puede ser extendida mas cerca de su extremo. Y como la eficiencia del ala mejora con la envergadura de esta, esto aumenta la efectividad del ala.

Efecto suelo

Otro fenómeno común que es mal entendido es el efecto suelo. Es el aumento de la eficiencia del ala cuando vuela a alturas de menos de la envergadura del ala. Un avión de ala baja, experimentara una disminución de la resistencia al avance de un 50%, justo antes de tocar el suelo. Existe una gran confusión con el efecto suelo. Muchos pilotos equivocadamente piensan que el efecto suelo resulta de la compresión del aire entre el ala y el suelo.

Para entender el efecto suelo es necesario entender el upwash. Por las presiones presentes en el vuelo de baja velocidad, el aire es considerado no compresible. Cuando el aire es acelerado sobre la cara superior del ala, y desviado hacia abajo,

este debe ser reemplazado. Por esto, parte del flujo del aire debe girar alrededor del ala (abajo y adelante, y luego arriba) para compensar, en forma similar, al flujo de agua alrededor de un remo de una canoa. Esta es la razón por la que se produce el upwash.

Lamentablemente, el upwash acelera el aire en una dirección, que es contraria a la necesaria para producir la sustentación. Luego es necesario producir una mayor cantidad de downwash y así producir la sustentación requerida. Cerca del suelo el upwash es reducido por la cercanía del suelo que inhibe la circulación del aire bajo el ala. Por esto menos downwash es necesario para producir la sustentación requerida. El ángulo de ataque es reducido, junto con la resistencia inducida, por lo que el ala se vuelve más eficiente.

Anteriormente estimamos que un avión Cessna 172 volando a 110 nudos desvía hacia abajo cerca de 2.5 toneladas de aire por segundo, para producir la sustentación requerida. En nuestros cálculos, no tomamos en cuenta el upwash.

De la magnitud del efecto suelo, queda claro que la cantidad de aire desviado hacia abajo debe ser aproximadamente el doble, del orden de 5 toneladas por segundo! .

Conclusiones

Veamos que hemos aprendido, descubramos cómo la definición física de la sustentación nos ha dado una mayor habilidad para entender el vuelo.

Primero, que hemos aprendido.

-La cantidad de aire desviado hacia abajo, es proporcional a la velocidad de desplazamiento del ala, y a la densidad del aire.

-La velocidad vertical del aire desviado hacia abajo, es proporcional a la velocidad de desplazamiento del ala, y al ángulo de ataque.

Ahora veamos algunas situaciones desde el punto de vista físico, y desde el punto de vista de la explicación popular.

La velocidad del avión es reducida. El punto de vista físico dice que la cantidad de aire desviado hacia abajo es reducido, luego el ángulo de ataque debe ser incrementado, para compensar. La potencia necesaria para sustentación, es también aumentada. La explicación popular, no puede responder a esto.

La carga del avión es incrementada. El punto de vista físico, dice que la cantidad de aire desviado hacia abajo es la misma, pero el ángulo de ataque debe aumentarse para obtener sustentación extra. La potencia necesaria, para producir la sustentación requerida, también es incrementada. Nuevamente la explicación popular no puede responder a esto.

Un avión vuela invertido. El punto de vista físico no tiene problema para responder. El avión ajusta su ángulo de ataque del ala invertida, para producir la sustentación requerida. La explicación popular implica que el vuelo invertido es imposible.

Como podemos ver, la explicación popular, la cual se centra en la forma del perfil del ala, puede satisfacer a muchos, pero no nos da las herramientas para realmente entender el vuelo. La descripción física de la sustentación, es fácil de entender, y tiene herramientas muy poderosas para responder a todas las variables relacionadas con la generación de la sustentación.