



Aerodinámica es la parte de la mecánica de fluidos que estudia los gases en movimiento y las fuerzas o reacciones a las que están sometidos los cuerpos que se hallan en su seno. A la importancia propia de la aerodinámica hay que añadir el valor de su aportación a la aeronáutica. De acuerdo con el número de Mach o velocidad relativa de un móvil con respecto al aire, la aerodinámica se divide en subsónica y supersónica según que dicho número sea inferior o superior a la unidad; en nuestro caso nos limitamos a la subsónica.

### 1.2.1 Principios aerodinámicos.

Hay ciertas leyes de la aerodinámica, aplicables a cualquier objeto moviéndose a través del aire, que explican el vuelo de objetos más pesados que el aire. Comencemos diciendo que un fluido que circula por la superficie de un cuerpo ejerce una fuerza sobre él, no importa si lo hace sobre un cuerpo estacionario o si es el cuerpo el que se mueve a través del fluido; dicho con otras palabras: para el estudio del vuelo es lo mismo considerar que el objeto se mueve a través del aire, como que este objeto esté inmóvil y es el aire el que se mueve a través de él (de esta última forma se prueban en los túneles de viento prototipos de alas).

La fuerza mencionada se produce por la interacción de un cuerpo sólido (por ejemplo un ala) con un fluido (tal como el aire) y no es producida por un campo de fuerza (como la gravedad) o un campo electromagnético, casos en los que los objetos no mantienen contacto entre ellos, sino que es imprescindible para que esa fuerza se genere que el cuerpo sólido (el ala) esté en contacto con el fluido (el aire) y que exista una diferencia de

Esta fuerza aerodinámica tiene dos componentes: la sustentación, que es perpendicular a la dirección del flujo original y la resistencia, que es paralela a la dirección del flujo, componentes que veremos con más detalle en el siguiente capítulo.

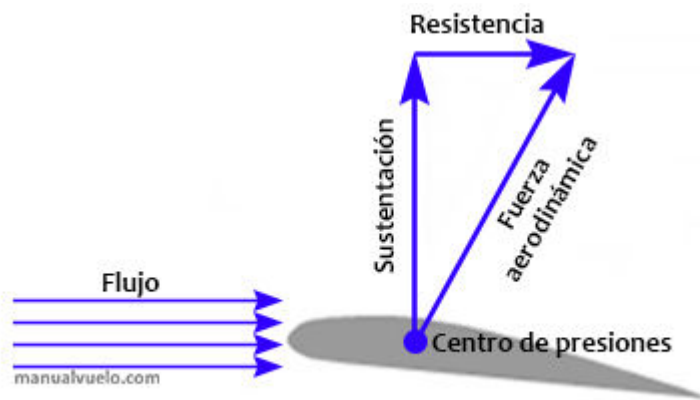


Fig.121 - Componentes de la fuerza aerodinámica.

A estas alturas y la vista de los ingenios mecánicos que vemos volar, cada vez más grandes y pesados desarrollando mayores velocidades, se podría deducir que la mayoría de las cuestiones relativas a la aerodinámica son más que conocidas. Y así es a nivel de modelos y ecuaciones matemáticas porque de otra forma no sería posible el espectacular desarrollo de la aeronáutica, pero otra cuestión muy distinta es cuando se trata de ofrecer una explicación desde el punto de vista de la física, al menos una visión fácilmente comprensible para los que no poseemos los arcanos de esta ciencia.

Los principios físicos empleados normalmente para explicar cómo se produce la fuerza denominada sustentación son: el principio de presión diferencial de Bernoulli y las leyes básicas del movimiento de Newton. Ambos son aplicables a todos los aspectos de la sustentación pero no bastan por si solos para explicarla en su totalidad. Lo que sigue a continuación son producto de mis lecturas e indagaciones al respecto más que de mi experiencia o profundo conocimiento, pero creo que son suficientes para este nivel elemental, no pretendiéndose una explicación ni exhaustiva ni detallada de las complejidades de la aerodinámica.

## 1.2.2 Principio de Bernoulli.

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que "la presión interna de un fluido (líquido o gas) decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa", o dicho de otra forma "en un fluido en movimiento en el que no se agrega ni se elimina energía, la suma de la presión ( $p$ ) y la velocidad ( $v$ ) en un punto cualquiera permanece constante".

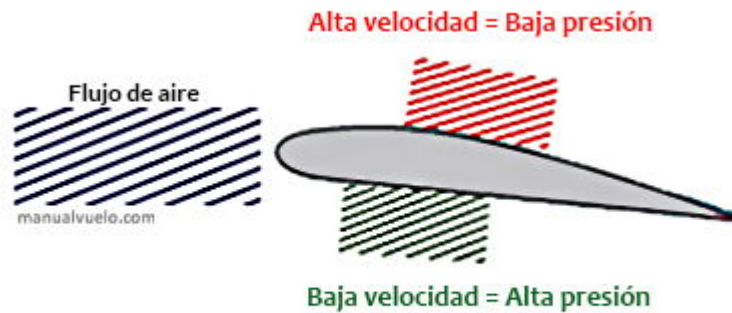


Fig.122 - Principio de Bernoulli aplicado en el ala.

El Principio de Bernoulli se suele expresar en la forma  $\rho + \frac{1}{2}dv^2 = \text{constante}$ , denominándose al factor  $\rho$  presión estática y al factor  $\frac{1}{2}dv^2$  presión dinámica. (1)

$$\rho + \frac{1}{2}dv^2 = k \quad \frac{1}{2}dv^2 = \rho d$$

$\rho$ =presión en un punto dado,  $d$ =densidad del fluido,  $v$ =velocidad en dicho punto,  $\rho d$ =presión dinámica.

Para cualquier sustentación generada por el perfil aerodinámico debe haber un desequilibrio de presión, es decir, una presión de aire promedio más baja en la parte superior que en la inferior. El principio de Bernoulli establece que esta diferencia de presión es provocada por una diferencia de velocidad y es esta diferencia la que crea una fuerza aerodinámica neta, apuntando hacia arriba.

Se puede considerar el Principio de Bernoulli como una derivación de la ley de conservación de la energía. El aire está dotado de presión  $\rho$  y este aire con una densidad  $d$  fluyendo a una velocidad  $v$  contiene energía cinética lo mismo que cualquier otro objeto en movimiento ( $\frac{1}{2} dv^2$ =energía cinética). Según la ley de la conservación de la energía, la suma de ambas es una constante:  $\rho + (\frac{1}{2}dv^2) = \text{constante}$ . A la vista de esta ecuación, para una misma densidad (asumimos que las partículas de aire alrededor del avión tienen igual densidad) si aumenta la velocidad  $v$  disminuirá la presión  $\rho$  y viceversa.

Enfocando este teorema desde otro punto de vista, se puede afirmar que en un fluido en movimiento la suma de la presión estática  $\rho_e$  más la presión dinámica  $\rho_d$ , denominada presión total  $\rho_t$ , es constante:  $\rho_t = \rho_e + \rho_d = k$ ; de donde se infiere que si la velocidad de un fluido se incrementa, la presión estática disminuye.

En resumen, que si las partículas de aire aumentan su velocidad será a costa de disminuir su presión y a la inversa, o lo que es lo mismo: para cualquier parcela de aire, alta



Como curiosidad, David Schmidt, ingeniero de la Universidad de Massachusetts llegó a la conclusión de que el motivo por el cual la cortina de la ducha se nos pega al cuerpo mientras nos duchamos se debe a que: "El agua pulverizada crea un vórtice de baja presión en el interior de la ducha que contrasta con la mayor presión del exterior; es el mismo principio de Bernoulli que permite a los aviones mantenerse en el aire".

En la siguiente imagen (fig.123) se muestra la diferencia de presiones entre la parte superior (extradós) e inferior (intradós) de un perfil aerodinámico, con unos ángulos de ataque de  $5^\circ$  y  $8^\circ$  respectivamente, obtenida a partir de un simulador (FoilSim) gratuito elaborado por la [N.A.S.A.](http://www.nasa.gov)

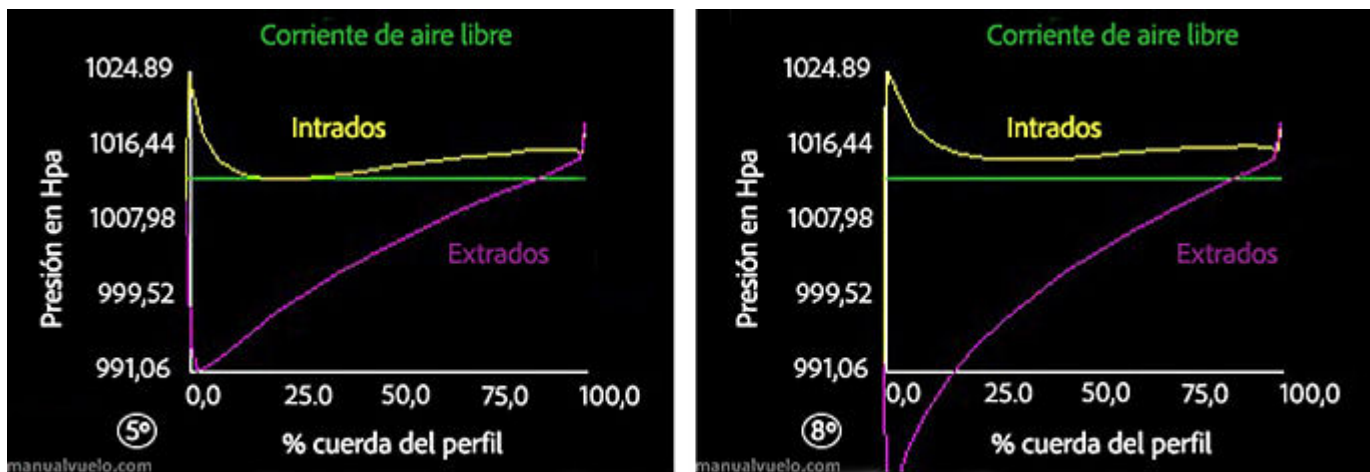


Fig.123 - Diferencia de presiones en un perfil aerodinámico.

### 1.2.3 Efecto Venturi.

Otro científico, Giovanni Battista Venturi, comprobó experimentalmente que al pasar por un estrechamiento las partículas de un fluido aumentan su velocidad y en consonancia con el Principio de Bernoulli disminuyen su presión.

exactamente la misma que la de salida y al ser el flujo constante, en el estrechamiento la velocidad aumenta para permitir al aire pasar en el mismo tiempo que en otras partes del tubo, resultando que en este punto y conforme al Principio de Bernoulli la presión disminuye; pasado el estrechamiento el flujo vuelve a la velocidad y presión de entrada.

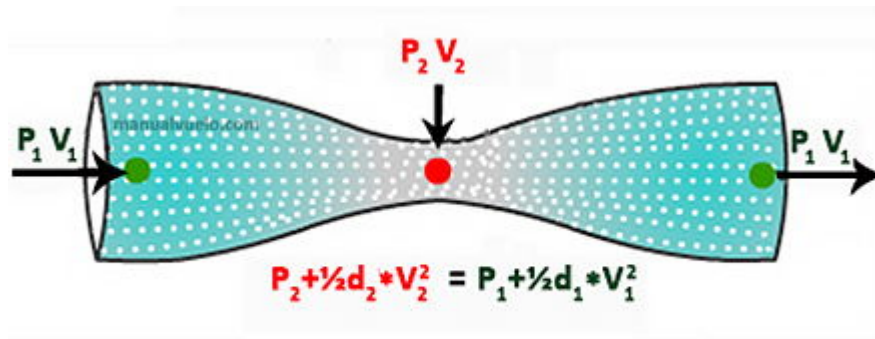


Fig.124 - Tubo Venturi.

Aunque el efecto Venturi se utiliza a menudo para explicar la sustentación producida en un perfil alar, en realidad es incorrecto pues el ala no actúa como un tubo Venturi; el ala suele estar curvada en la parte superior (no necesariamente) pero no por eso representa un estrechamiento del estilo del tubo Venturi. Este mecanismo si se utiliza para proveer de succión a los instrumentos del avión que trabajan con vacío (coordinador de giro, horizonte artificial, etc.) en los aviones que no cuentan con medios para proporcionar ese vacío.

#### 1.2.4 Leyes del movimiento de Newton.

**1ª ley:** Conocida también como Ley de Inercia dice que: todo objeto persiste en su estado de reposo o movimiento uniforme en línea recta a menos que se vea obligado a cambiar ese estado por el efecto de una fuerza externa.

Esto significa que nada comienza a moverse, pararse o cambiar de dirección hasta que alguna fuerza externa le obligue a hacerlo. Un objeto en reposo permanece en ese estado a menos que se aplique una fuerza lo suficientemente fuerte como para superar su inercia; una vez que se está moviendo su inercia lo mantiene en movimiento rectilíneo hasta que otra fuerza lo acelere, desacelere o lo cambie de dirección.

**2ª ley:** La aceleración que experimenta un objeto es proporcional a la fuerza que actúa sobre el mismo e inversamente proporcional a su masa; dicho de otra forma; cuando una fuerza constante actúa sobre un cuerpo la aceleración resultante es inversamente





**3ª ley:** Para cada fuerza de acción hay una fuerza de reacción igual en intensidad pero de sentido contrario: si un objeto A ejerce una fuerza sobre un objeto B, el objeto B ejerce una fuerza de igual intensidad pero de sentido opuesto sobre el objeto A.

### 1.2.5 Porqué vuelan los aviones.

Existen al menos dos versiones que, a veces con excesiva pasión, reclaman para sí la explicación más coherente sobre el proceso de sustentación. Una de ellas se apoya principalmente en el teorema de Bernoulli (baja presión encima del ala y alta presión debajo del ala) mientras que la otra se basa en las leyes de Newton (el flujo de aire deflectado hacia abajo ("downwash") produce una reacción hacia arriba). Ambas explicaciones no son tan incompatibles como a veces quieren hacernos creer, y aunque mi conocimiento de la física es muy limitado, lo que el sentido común me dicta después de haber leído unos cuantos artículos al respecto es que posiblemente se trate de puntos de vista distintos, dos formas diferentes de simplificar un único suceso complicado. Aunque el tema es excitante, excede el propósito de este "manual", no obstante, a los interesados en profundizar en él les recomiendo visitar algunas de las páginas cuyos enlaces propongo.

Un objeto plano, colocado un poco inclinado hacia arriba contra el viento produce sustentación; por ejemplo una cometa. Un perfil aerodinámico, es un cuerpo que tiene un diseño determinado para aprovechar al máximo las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este perfil se sitúa en una corriente de aire; un ala es un ejemplo de diseño avanzado de perfil aerodinámico.

Veamos que sucede cuando un aparato dotado de perfiles aerodinámicos (alas) se mueve en el aire (dotado de presión atmosférica y velocidad), a una cierta velocidad y con determinada colocación hacia arriba (ángulo de ataque), de acuerdo con las anteriores leyes explicadas.

El ala produce un flujo de aire en proporción a su ángulo de ataque y a la velocidad con que el ala se mueve respecto a la masa de aire que la rodea; de este flujo de aire, el que discurre por la parte superior del perfil tendrá una velocidad sustancialmente mayor que el que discurre por la parte inferior. Esa mayor velocidad implica menor presión (Principio de Bernoulli).

Tenemos pues que la superficie superior del ala soporta menos presión que la superficie inferior. Esta diferencia de presiones produce una fuerza aerodinámica que empuja al ala



Pero además, la corriente de aire que fluye a mayor velocidad por encima del ala, al confluir con la que fluye por debajo deflecta a esta última hacia abajo (downwash), produciéndose una fuerza de reacción adicional hacia arriba. La suma de estas dos fuerzas es lo que se conoce por fuerza de sustentación, que es la que mantiene al avión en el aire.

De acuerdo con la 2ª ley de Newton la fuerza total producida será igual a la masa de aire desviado multiplicado por la aceleración dada al mismo.

Como hemos visto, la producción de sustentación es un proceso continuo en el cual cada uno de los principios enumerados explica una parte distinta de este proceso. Esta producción de sustentación no es infinita, sino que como veremos en capítulos posteriores tiene un límite.

### 1.2.6 Discutible o erróneo.

Hay algunas teorías y explicaciones con respecto a la producción de sustentación que enfrentadas con los hechos y con pruebas realizadas resultan discutibles. Para evitar confusiones conviene contrastar algunos detalles.

Se mantiene a veces, que un ala produce sustentación debido a que la forma del perfil (curvado por arriba y plano por abajo) obliga al aire que pasa por encima del perfil a recorrer más distancia en el mismo tiempo que el que pasa por debajo y eso solo puede hacerse, lógicamente, a mayor velocidad. Resulta atractivo ¿verdad? Pues esta teoría llamada de “igual transito” es incorrecta.

Esta teoría implica: primero, que es necesario que un perfil tenga diferencia de curvatura entre su parte superior e inferior, y segundo, que la parcela de aire dividida por el perfil recorra este por arriba y por abajo en el mismo tiempo para encontrarse en la parte posterior de dicho perfil. Sin embargo, en vuelo invertido la forma del perfil del ala es más curvada por abajo que por arriba y sigue produciendo sustentación, y hay aviones



¿no?

Por otro lado, las pruebas realizadas en túneles de viento muestran que la capa de aire que recorre la parte superior (a pesar de la mayor distancia) lo hace en un tiempo sensiblemente menor que la capa que recorre la parte inferior, además de que ambas no vuelven a coincidir en la parte posterior del perfil. ¿Adónde nos lleva esto? A afirmarnos en que los principios reseñados de porqué vuela un avión son válidos, con independencia de la simetría o asimetría del perfil y de la diferencia de curvatura entre las superficies superior e inferior.

Por ejemplo, el ala usada por los hermanos Wright en su primer aeroplano era delgada, muy curvada y algo cóncava por la parte inferior. No tenía diferencia significativa de curvatura entre la parte superior e inferior y sin embargo producía sustentación debido a los mismos principios que las alas de hoy en día.

En este video [How wings really work](#) el profesor Holger Babinsky de la Universidad de Cambridge filmó pulsos de humo inyectados en el aire que fluye alrededor de un perfil aerodinámico. Cuando el video está en pausa se ve que los tiempos de tránsito por encima y por debajo del ala no son iguales: el aire se mueve más rápido sobre la superficie superior y ya ha pasado el extremo del ala cuando el flujo por debajo del perfil aerodinámico llega al final de la superficie inferior.

En este otro vídeo [Boundary Layer Control](#) del Massachusetts Institute of Technology se puede ver un interesante trabajo de un perfil en un tunel de viento.

Si la sustentación dependiera únicamente de la forma del ala, puesto que esta forma no cambia con el vuelo, no habría forma de variar la sustentación; el aeroplano solo soportaría su peso a una velocidad determinada y además sería inestable e incontrolable. Veremos más adelante como el piloto regula la sustentación mediante el control del ángulo de ataque y la velocidad.

Para terminar, decir que los diseños de alas curvadas y con diferencia de curvatura entre la parte superior e inferior responden a razones eminentemente prácticas, pues estos perfiles mejoran la sustentación y tienen mejores características ante la pérdida.

Un par de lecturas y un vídeo recomendables: ["Bernoulli's Principle."](#) , ["Conceptos erróneos sobre la sustentación."](#) y ["El principio de Bernoulli."](#)





- viceversa.
- Venturi demostró que un fluido al pasar por un estrechamiento es acelerado.
  - A una fuerza de acción se le opone otra de reacción de igual intensidad pero de sentido contrario, dice la 3ª Ley del Movimiento de Newton.
  - Un ala es muy efectiva cambiando la velocidad del aire: el que fluye por encima es acelerado mientras que el que fluye por debajo es retardado, incluso aunque el que pase por arriba tenga un camino más largo alcanzará el borde de salida antes que el que pasa por abajo.
  - La disminución de presión por encima del ala es mucho más pronunciada que el aumento de presión por debajo de la misma.
  - Cada parcela de aire sufre un cambio temporal en su velocidad al ser incidida por el ala; al alcanzar el borde de salida tenderá a recuperar la velocidad del aire libre.
  - Un ala moviéndose a través del aire produce un flujo circulatorio proporcional al ángulo de ataque y a la velocidad con que incide sobre este aire. Este flujo circulatorio es más rápido por la parte superior que por la inferior del ala. La diferente velocidad produce diferente presión y esta presión diferencial produce sustentación.
  - La deflexión hacia abajo del flujo de aire en el borde de salida del ala, produce una fuerza de reacción hacia arriba que también genera sustentación.
  - Es deseable, pero no imprescindible, que la parte superior del ala sea más curvada que la parte inferior.

(1) Más exactamente el teorema de Bernoulli dice: "Cuando en un fluido ideal se produce una corriente estacionaria, a lo largo de la línea de corriente se produce la ecuación  $\rho + dgh + \frac{1}{2}dv^2 = \text{constante}$ , siendo:  $\rho$  la presión en el punto considerado,  $d$  la densidad del fluido,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h$  la altura respecto a un nivel de referencia común a todos los puntos del fluido y  $v$  la velocidad del mismo".



© Miguel Angel Muñoz Navarro  
mmunoz@manualvuelo.com