

Fluidodinámica. Tipos de flujo

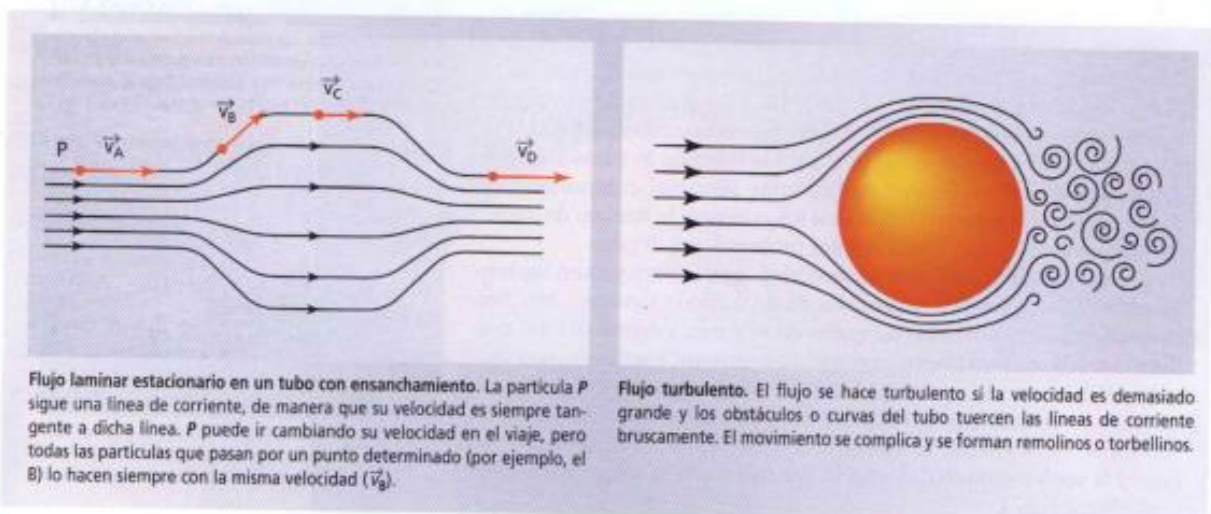
La sangre circula por nuestras venas y el aire fluye por nuestros pulmones. Los combustibles circulan por los motores de los vehículos y el agua fluye por las cañerías de nuestras casas.

En este capítulo nos abocaremos al estudio de los fluidos en movimiento. Para comenzar distinguiremos entre dos tipos de flujo: **laminar** y **turbulento**. Si observamos un cigarrillo encendido apoyado en un cenicero, vemos que al principio el humo asciende suavemente en una fina columna sin entremezclarse; pero luego, en un punto más alto, la columna se rompe y el humo se difunde en el aire circundante de manera irregular y retorcida. La parte lisa de este flujo se llama **laminar**, y la parte arremolinada **turbulenta**. Cuando se vuelca un chorro de miel, el flujo es laminar; cuando se echa humo del cigarrillo por la boca, el flujo es turbulento.

La diferencia principal entre ambos movimientos es que, en el laminar, las pequeñas porciones de fluido se mueven ordenadamente, manteniendo una estructura de capas regulares que no se mezclan entre sí. Se dice que el flujo laminar es **estacionario**, si cada pequeña región de fluido que pasa por un determinado punto lo hace con la misma velocidad que todas las partículas que pasaron antes por ese mismo punto. A un determinado punto del espacio ocupado por el fluido le corresponde la misma velocidad en todo instante. Así, *las trayectorias que siguen las partículas no cambian con el tiempo*. Estas trayectorias regulares se denominan **líneas de flujo** o **de corriente** y no se cruzan nunca, porque de lo contrario en el punto de intersección de una trayectoria con otra, no habría un único valor de velocidad (en otras palabras, la trayectoria no estaría bien determinada).



El flujo del humo de un cigarrillo es primero laminar y luego turbulento.



Flujo laminar estacionario en un tubo con ensanchamiento. La partícula P sigue una línea de corriente, de manera que su velocidad es siempre tangente a dicha línea. P puede ir cambiando su velocidad en el viaje, pero todas las partículas que pasan por un punto determinado (por ejemplo, el B) lo hacen siempre con la misma velocidad (\vec{v}_B).

Flujo turbulento. El flujo se hace turbulento si la velocidad es demasiado grande y los obstáculos o curvas del tubo tuercen las líneas de corriente bruscamente. El movimiento se complica y se forman remolinos o torbellinos.

Para nuestro estudio no pretenderemos especificar la historia del viaje de cada partícula de fluido. Nuestro método enfocará la atención en lo que ocurre en cada punto del espacio en un momento determinado; por ejemplo, dando la presión y la velocidad del fluido en ese punto para ese instante.

Al deslizar una capa de fluido sobre otra, aparece un tipo de fricción que afecta el movimiento del líquido y que implica una pérdida de energía. Esta propiedad, llamada **viscosidad**, es muy notable en fluidos como la glicerina, el alquitrán o la miel.

Con el fin de simplificar el estudio inicial trabajaremos con un **fluido ideal** que cumple con las siguientes características:

- es incompresible;
- es no viscoso;
- su flujo es laminar estacionario.



▲ ¿Cómo es la densidad de un fluido incompresible?

Caudal. Ecuación de continuidad

Una nena llena su pileta con una manguera. Impaciente por lograrlo, estrecha el orificio de salida del agua, apretándolo con sus dedos. La intención de la nena es reducir el tiempo de llenado de la pileta, es decir, conseguir que fluya el mayor volumen de líquido en el menor tiempo posible. ¿Logrará su objetivo?

La magnitud asociada al volumen de líquido que en un intervalo de tiempo pasa por la sección de un tubo se denomina **caudal** (Q). Si su valor no cambia en el tiempo, se lo define como el cociente entre el volumen de líquido (V) que pasa a través de la sección y el tiempo empleado para hacerlo (Δt).

$$Q = V / \Delta t$$

En el sistema MKS las unidades de Q son: $[Q] = \text{m}^3/\text{s}$

Alguna vez habrán notado que en un río se forman "rápidos" cuando pasa a través de una garganta. ¿Por qué? Para responder a esta cuestión consideremos primero un trozo de tubería de sección uniforme por la que circula un líquido incompresible. Como el líquido no se puede "amontonar" (porque es incompresible), ni existen fugas, *el volumen de líquido que entra al tubo debe ser igual al volumen que sale de él.*

¿Qué volumen de líquido se renovó al transcurrir un lapso Δt ? Si la velocidad del fluido en el tubo es v , en un lapso Δt , las partículas a la entrada habrán avanzado una longitud $l = v \cdot \Delta t$, y lo mismo habrán recorrido las partículas a la salida. Si S es la sección del tubo, entonces, el volumen V de líquido renovado en ese tiempo es:

$$V = S \cdot l = S \cdot v \cdot \Delta t$$

¿Qué sucede si el tubo tiene un estrechamiento? Como la sección se reduce, la única manera de que simultáneamente salga el mismo volumen de líquido que entra, es que la velocidad del fluido en la sección angosta sea mayor que en la sección ancha. *De manera que:*

$$V_{\text{entrada}} = V_{\text{salida}} \Rightarrow S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t \Rightarrow S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

Como los puntos 1 y 2 son cualesquiera dentro del fluido, se deduce que el producto $S \cdot v$ valdrá lo mismo en todo punto. Es decir:

$$S \cdot v = \text{constante}$$

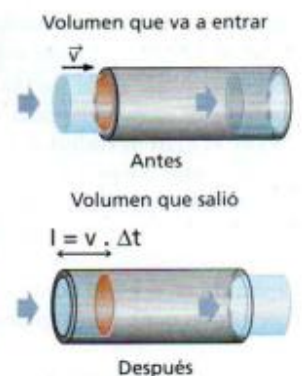
Ésta es la **ecuación de continuidad** que expresa que *la velocidad de un fluido incompresible que circula por un tubo es inversamente proporcional a la sección del tubo.* Ahora bien; dado que:

$$Q = V / \Delta t = S \cdot v \cdot \Delta t / \Delta t = S \cdot v$$

la ecuación de continuidad establece que *cuando el fluido es ideal, el caudal se mantiene constante.*

Notemos que en las partes más angostas del tubo (donde la velocidad es mayor), las líneas de corriente están más próximas entre sí; por el contrario, en las partes más anchas (donde la velocidad es menor), las líneas de corriente están más separadas. En consecuencia, el mapa de líneas de corriente nos da mucha información, a saber: la dirección y el sentido de la velocidad del fluido en cada punto; y también nos da una idea cualitativa del módulo de la velocidad, según la densidad de las líneas de corriente de la zona.

Finalmente: ¿qué le dirían a la nena de nuestro ejemplo?



Si no existen fugas y el fluido es incompresible, el volumen que entra al tubo es igual al que sale de él.



Si el fluido es incompresible, se cumple $S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$.



Líneas de corriente en un estrechamiento.

Teorema de Bernoulli

A continuación estudiaremos la circulación de fluidos incompresibles, de manera que podremos explicar fenómenos tan distintos como el vuelo de un avión o la circulación del humo por una chimenea. El estudio de la dinámica de los fluidos fue bautizada **hidrodinámica** por el físico suizo Daniel Bernoulli, quien en 1738 encontró la relación fundamental entre la presión, la altura y la velocidad de un fluido ideal. El *teorema de Bernoulli* demuestra que estas variables no pueden modificarse independientemente una de la otra, sino que están determinadas por la energía mecánica del sistema.

Supongamos que un fluido ideal circula por una cañería como la que muestra la figura. Concentremos nuestra atención en una pequeña porción de fluido V (coloreada con celeste): al cabo de cierto intervalo de tiempo Δt , el fluido ocupará una nueva posición (coloreada con rojo) dentro de la cañería. ¿Cuál es la fuerza "exterior" a la porción V que la impulsa por la cañería? Sobre el extremo inferior de esa porción, el fluido "que viene de atrás" ejerce una

fuerza que, en términos de la presión p_1 , puede expresarse como $p_1 \cdot A_1$, y está aplicada en el sentido del flujo. Análogamente, en el extremo superior, el fluido "que está adelante" ejerce una fuerza sobre la porción V que puede expresarse como $p_2 \cdot A_2$, y está aplicada en sentido contrario al flujo. Es decir que el trabajo (T) de las fuerzas no conservativas que están actuando *sobre* la porción de fluido puede expresarse en la forma:

$$T = F_1 \cdot \Delta x_1 - F_2 \cdot \Delta x_2 = p_1 \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 - p_2 \cdot A_2 \cdot \Delta x_2$$

Si tenemos en cuenta que el fluido es ideal, el volumen que pasa por el punto 1 en un tiempo Δt es el mismo que pasa por el punto 2 en el mismo intervalo de tiempo (conservación de caudal). Por lo tanto:

$$V = A_1 \cdot \Delta x_1 = A_2 \cdot \Delta x_2 \Rightarrow T = p_1 \cdot V - p_2 \cdot V$$

El trabajo del fluido sobre esta porción particular se "invierte" en cambiar la velocidad del fluido y en levantar el agua en contra de la fuerza gravitatoria. En otras palabras, el trabajo de las fuerzas no conservativas que actúan sobre la porción del fluido es igual a la variación de su energía mecánica. Tenemos entonces que:

$$T = \Delta E_{\text{cinética}} + \Delta E_{\text{potencial}} = (E_{c2} - E_{c1}) + (E_{p2} - E_{p1})$$

$$p_1 \cdot V - p_2 \cdot V = (1/2 \cdot m \cdot v_2^2 - 1/2 \cdot m \cdot v_1^2) + (m \cdot g \cdot h_2 - m \cdot g \cdot h_1)$$

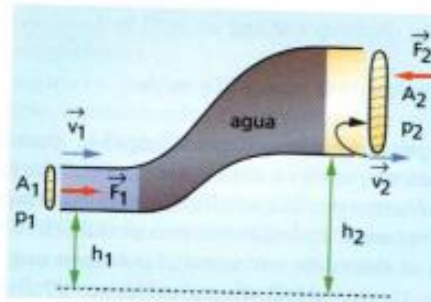
Considerando que la densidad del fluido está dada por $\delta = m/V$, podemos acomodar la expresión anterior para demostrar que:

$$p_1 + 1/2 \cdot \delta \cdot v_1^2 + \delta \cdot g \cdot h_1 = p_2 + 1/2 \cdot \delta \cdot v_2^2 + \delta \cdot g \cdot h_2$$

Noten que, como los puntos 1 y 2 son puntos cualesquiera dentro de la tubería, Bernoulli pudo demostrar que la presión, la velocidad y la altura de un fluido que circula varían siempre manteniendo una cierta cantidad constante, dada por:

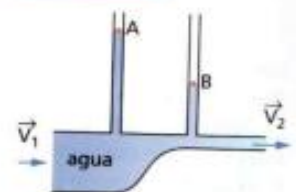
$$p + 1/2 \cdot \delta \cdot v^2 + \delta \cdot g \cdot h = \text{constante}$$

Veremos la cantidad de aplicaciones que pueden explicarse gracias a este teorema.



Fluido humano. Una multitud de espectadores pretende salir de una gran sala de proyecciones al término de la función de cine. El salón es muy ancho, pero tiene abierta al fondo sólo una pequeña puerta que franquea el paso a una galería estrecha que conduce hasta la calle. La gente, impaciente dentro de la sala, se aglomera contra la puerta, abriéndose paso a empujones y codazos. La velocidad con que avanza este "fluido humano" antes de cruzar la puerta es pequeña y la presión es grande. Cuando las personas acceden a la galería, el tránsito se hace más rápido y la presión se alivia.

Si bien este fluido no es ideal, puesto que es compresible y viscoso (incluso podría ser turbulento), constituye un buen modelo de circulación dentro de un tubo que se estrecha. Observamos que en la zona angosta la velocidad de la corriente es mayor y la presión es menor.



▲ En el tubo horizontal circula un fluido, que está en reposo en ambos tubos verticales. En los puntos A y B la presión es la atmosférica. ¿A qué se debe la diferencia de altura en las columnas?

Viscosidad

¿Probaron alguna vez verter miel fría en invierno? ¿Por qué tarda tanto en volcarse? Cuando un líquido se mueve no lo hace todo en conjunto, sino que una porción determinada se desplaza con respecto a su vecina, y entre ellas aparece una *fricción* interna. En este caso decimos que *el fluido es viscoso*. El fenómeno se repite entre las sucesivas capas que se van poniendo en movimiento, y esto determina la manera en que se mueve el fluido.

La viscosidad en los líquidos se origina en la fuerza de cohesión de las moléculas del líquido entre sí y las de los sólidos que están en contacto con él. En los gases, donde las moléculas están más separadas, proviene del intercambio de la cantidad de movimiento en las colisiones intermoleculares. Su efecto es hacer más lento el flujo del fluido, convirtiendo energía mecánica en energía calorífica.

Todos los fluidos son más o menos viscosos (salvo excepciones, como la del helio en ciertas condiciones, en las que es un **superfluido**). Algunos se caracterizan por su gran viscosidad, como el almíbar, el alquitrán o la miel. El grado de viscosidad de un líquido se puede apreciar en función de la rapidez con que se sumerge un sólido en él, o bien por la velocidad con que sale por un orificio.

¿Podemos cambiar la viscosidad de un fluido? La viscosidad de un líquido disminuye con la temperatura: por ejemplo, el obrero calienta el alquitrán para derramarlo. En cambio, en los gases, al aumentar la temperatura crece el caos molecular y la viscosidad aumenta.

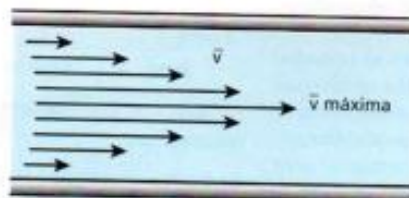
Imaginemos dos placas de vidrio separadas por un fluido viscoso. Si queremos hacer deslizar la placa superior sobre la placa inferior inmóvil, el grado de viscosidad del líquido nos hará la empresa más o menos fácil. La placa superior deslizará más fácilmente si el fluido es aceite que si es alquitrán.

Las partículas de los fluidos que están en contacto directo con los límites sólidos que lo encierran no deslizan con respecto a ellos, es decir que la película superior del fluido desliza en conjunto con la placa superior móvil, mientras que la película inferior se queda quieta, adherida a la placa fija. Entre ambas, las capas intermedias resbalan una sobre otra, avanzando cada una de ellas un poco más lentamente que la capa que tiene inmediatamente por encima.

Cuando el líquido fluye por un tubo circular de sección uniforme, si el flujo es laminar, las capas son cilindros concéntricos que resbalan uno dentro de otro, de manera que la velocidad mayor es la de la línea de corriente central. Si la velocidad aumenta, el flujo deja de ser estratificado para mezclarse formando remolinos, y se denomina **turbulento**.



Si el flujo es laminar, el líquido fluye formando cilindros concéntricos.



Distribución de velocidades para un flujo laminar estratificado en un tubo de sección constante.

Química



Fuerzas de cohesión intermoleculares.



La miel es un fluido muy viscoso.



Cuando se transportan fluidos a grandes distancias, las pérdidas de energía debida a la fricción viscosa son importantes. Por esta razón se instalan bombas a lo largo de la ruta, con el objeto de levantar la presión y conservar el movimiento del agua, petróleo o gas transportado.

Cómo se mueven los gases

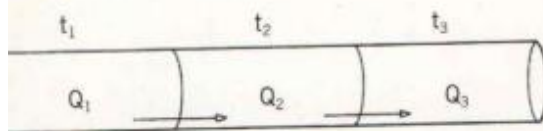
Si bien existen muchas similitudes entre el movimiento de los líquidos y los gases, hay un hecho que los distingue: los gases son compresibles, es decir, pueden variar su volumen.

Si se considera la cañería por la que llega el gas desde los pozos de producción a los depósitos de distribución domiciliaria, es decir, se analiza el caño de un gasoducto, podría caracterizarse el movimiento del fluido mediante el caudal, de la misma manera que se hizo para los líquidos.

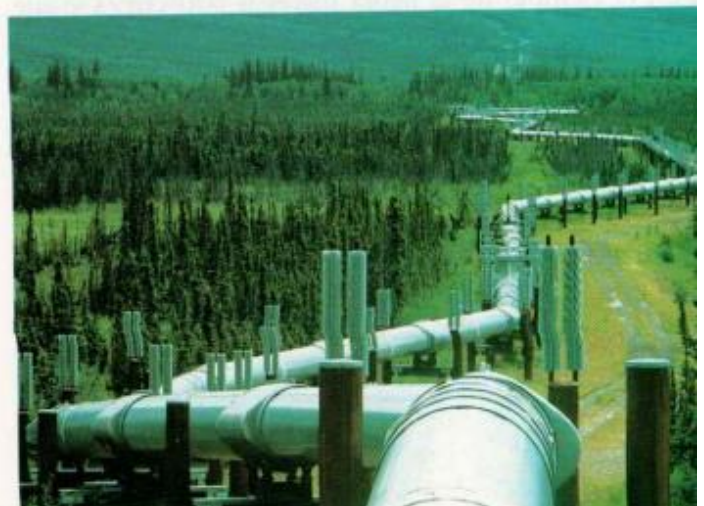
Así puede medirse el volumen que atraviesa una sección del caño en un determinado tiempo y calcular el caudal. Podría dar, por ejemplo, $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Es decir que por esa sección del caño pasan 2 m^3 de gas en cada segundo.

Si el gas se comportase igual que el líquido, podría decirse que hasta que no haya salida o entrada de gas en el caño, el caudal seguirá siendo el mismo. Pero como el volumen de un gas puede cambiar, el caudal también cambia, es decir que no se cumple la condición de continuidad.

Por ejemplo, si el caño va atravesando regiones de diferentes temperaturas, el gas se contrae en las regiones más frías y se dilata en las más cálidas, variando por lo tanto el caudal.



$$Q_1 \neq Q_2 \neq Q_3$$



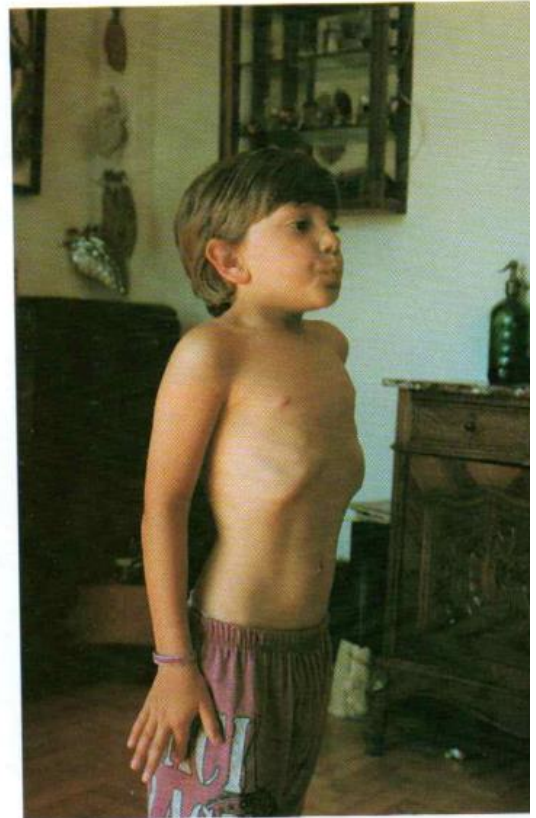
Por qué se mueven los fluidos

La causa del movimiento de fluidos es siempre una diferencia de presiones. Los fluidos siempre se mueven desde mayores presiones hacia menores presiones. Los ejemplos son muchos y fáciles de comprender.

Movimiento del aire durante la ventilación pulmonar

El aire se encuentra a nuestro alrededor a la presión atmosférica. Para que ingrese a los pulmones debe reducirse la presión interior. Cuando el músculo diafragma baja y el tórax se expande, baja la presión en el interior de los pulmones. El aire se mueve entonces desde la mayor presión, la atmosférica, a la menor presión que hay en los pulmones.

Inmediatamente después, para expulsar parte del aire de los pulmones, el diafragma sube y el tórax se contrae, por lo que aumenta la presión del aire en los pulmones. El aire se mueve entonces hacia el exterior donde la presión es menor.



Vientos

La presión atmosférica depende de muchos factores y la descripción del movimiento de grandes masas de aire, es decir, de los vientos, resulta complicada.

Simplificándola bastante, se puede decir que debido a movimientos del aire, por ejemplo ascensos de masas de aire por diferencias de temperatura, se generan zonas de relativamente alta presión, llamados *centros ciclónicos* y otras zonas de relativa baja presión, llamados *centros anticiclónicos*. El aire, como todo fluido, se mueve desde los centros de alta presión hacia los de ba-

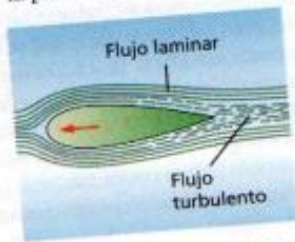
La física de la locomoción acuática y aérea

Natación

Los animales que nadan prácticamente no necesitan realizar esfuerzos para sostener su propio peso. La mayoría de los peces posee un órgano precursor del pulmón, llamado **vejiga natatoria**, que utilizan para controlar la flotación. Consiste en una cámara que se llena de oxígeno y nitrógeno extraídos de la sangre, y sus principales funciones son: adaptar al animal a la presión existente a diferentes profundidades y regular el empuje del agua para que tenga capacidad de flotar.

La elevada densidad del agua otorga, a la vez, una ventaja y una dificultad. Aunque les permite flotar con facilidad, también les presenta gran resistencia al avance. Este obstáculo para el movimiento ha ocasionado la sorprendente similitud que existe entre las formas corporales de la mayoría de ellos.

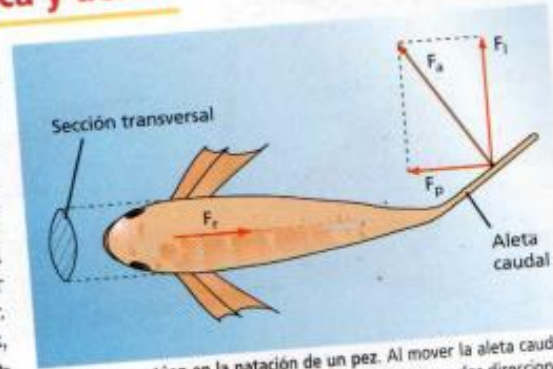
Las formas, largas y maravillosamente hidrodinámicas, facilitan el flujo laminar, minimizando las pérdidas de energía en la propulsión. Además de la forma, poseen otra propiedad que reduce la turbulencia: la superficie corporal es muy elástica. Esta elasticidad amortigua las pequeñas perturbaciones que provoca la presión del agua que fluye sobre la superficie del cuerpo, aminorando así las variaciones locales de la presión, generadoras de torbellinos.



Gracias a su forma hidrodinámica, los peces, los mamíferos marinos (como las focas, marsopas y ballenas) y las aves voladoras consiguen pasar a través del agua casi sin provocar turbulencia, incluso cuando lo hacen a gran velocidad.

Las observaciones indican que los peces y mamíferos grandes nadan más rápido que sus congéneres más chicos. ¿A qué se debe esta diferencia? La velocidad que alcanza un animal acuático depende de la relación que existe entre la fuerza impulsora que puede desarrollar y la resistencia que opone el medio al avance. Mientras que la primera depende del volumen del cuerpo (que es proporcional al cubo de alguna dimensión corporal), la segunda es proporcional a la superficie transversal del animal (proporcional, a su vez, al cuadrado de alguna dimensión corporal).

Al incrementar "la escala", es más lo que crece el volumen que lo que aumenta la superficie transversal. Por lo tanto, un animal acuático grande puede desarrollar, en proporción, una fuerza mucho mayor que la que le opone el medio, siendo capaz de alcanzar velocidades varias veces mayores que un ejemplar de igual forma, pero menor tamaño.



Fuerzas que actúan en la natación de un pez. Al mover la aleta caudal, se opone la fuerza del agua (F_p), que se descompone en dos direcciones: la fuerza propulsora (F_p) y la fuerza lateral (F_l). El agua también opone una fuerza de resistencia (F_r). El peso y el empuje están en la dirección perpendicular al papel.

Curiosamente, la relación que existe entre la fuerza desarrollada por el animal y la fuerza de resistencia determina que todos los animales acuáticos, independientemente de su tamaño, alcancen velocidades del orden de 10 longitudes corporales por segundo (los mejores nadadores pueden llegar a 15 longitudes/s). Así, mientras que un paramecio (organismo unicelular) no puede superar los 0,01 km/h, un atún logra nadar a 75 km/h.

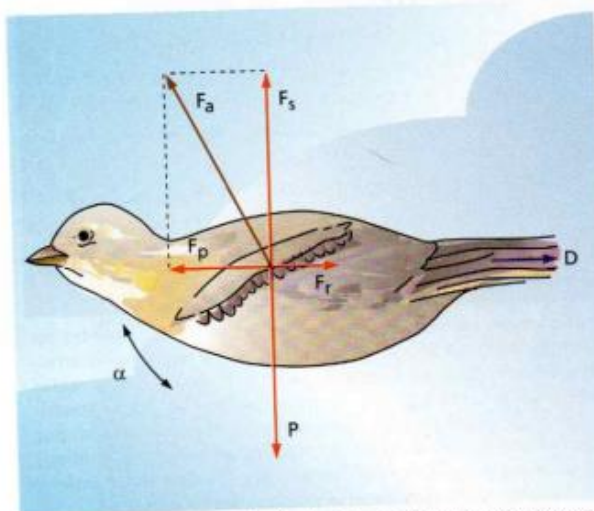


La aleta horizontal de la cola de los delfines, similar a la de otros mamíferos acuáticos, se mueve en sentido vertical y provoca la propulsión del animal hacia adelante; las aletas situadas a ambos lados del cuerpo actúan como estabilizadores. Su forma, perfectamente hidrodinámica, les permite alcanzar velocidades de hasta 40 km/h. Debido a que sus pulmones están adaptados para contrarrestar los problemas derivados de los cambios de presión, pueden descender hasta profundidades de más de 300 m.

Vuelo

Las disimilitudes corporales que existen entre los peces y las aves reflejan las grandes diferencias que hay entre las propiedades físicas del agua y del aire. El aire, mucho menos denso que el agua, es un medio muy poco propicio para flotar. Por ello, todos los animales voladores debieron desarrollar medios que les permitieran una fuerza de sustentación para vencer la gravedad. Sin embargo, la baja densidad del aire también ofrece una ventaja: la forma de las aves no necesita ser tan aerodinámica como la de los peces. Y si bien la resistencia al avance aumenta con la velocidad, pueden alcanzar velocidades mucho mayores que las de los animales acuáticos.

La fuerza propulsora para dirigir al ave hacia adelante, y la de sustentación, para mantenerla, se consiguen simultáneamente con el batido de las alas, como se muestra en la figura.



El ala impulsa el aire hacia abajo y hacia atrás, creando una reacción hacia adelante y hacia arriba (F_a). Esta fuerza se descompone en dos direcciones: la de sustentación (F_s) y la de propulsión (F_p). Éstas son las responsables de sostener el peso del ave (P) y oponer la resistencia al avance (F_r), respectivamente.

Este tipo de vuelo, denominado a veces **vuelo verdadero**, es diferente del **planeo**, en el cual el animal extiende sus alas para mantenerse en el aire, con muy poco o ningún movimiento. Cuando un ave planea, sus alas, largas y anchas, producen una sustentación magnífica. Sin embargo, si se sumergiese en un líquido, generaría una resistencia excesiva. Y es por ello que las



Las aves, los murciélagos y los insectos se autopulsan en el aire batiendo sus alas.




El vuelo mediante planeo es utilizado por algunos peces, mamíferos, anfibios y reptiles, y también lo emplean a veces ciertas aves, como los halcones, los buitres y las gaviotas.

alas de los pingüinos se han modificado en paletas cortas, que se pliegan contra el cuerpo cuando se deslizan en el agua.

Fuentes: Eckert, Roger. *Fisiología animal (mecanismos y adaptaciones)*, 3ra. edición. Madrid, Interamericana-McGraw-Hill. *Enciclopedia Microsoft Encarta 97*.

Vuelo

Desde siempre el hombre ha soñado con volar. Fue preciso que evolucionaran la Ciencia y la técnica para que ese sueño se hiciera realidad.



Fuerza de sustentación

Peso


Fuerza de arrastre

Fuerza propulsora

Las naves aeronáuticas están sometidas básicamente a cuatro fuerzas: la **fuerza de sustentación**, el **peso**, la **fuerza de propulsión** y la **fuerza de rozamiento viscoso** (o "de arrastre"). En el avión en vuelo recto y nivelado, sin aceleración, la fuerza de sustentación compensa al peso, y la fuerza de propulsión compensa a la fuerza de arrastre.

Peso


Se debe reducir el peso de la nave usando materiales de la menor densidad posible, metales o aleaciones livianas que aseguren la solidez necesaria. El avance de la aeronáutica requirió, a la vez, el desarrollo de motores potentes y livianos.



Peso

Fuerza viscosa o de arrastre


La aerodinamización de la nave permite reducir la fuerza de resistencia al avance para minimizar el gasto energético. La fuerza de fricción del aire crece rápidamente con la velocidad, por lo que es fundamental contar con un diseño óptimo que minimice sus efectos. La forma de gota, regular, alargada y lisa imitando la de un pez o de un pájaro, resulta óptima. El tren de aterrizaje afuera, las antenas y un revestimiento mal pulimentado aumentan la fricción.




Fuerza de arrastre

Fuerza propulsora

Es necesario que el aire ejerza sobre la nave, en el sentido que avanza, la fuerza propulsora (que los pájaros logran con el aleteo). La propulsión puede ser a hélice o con motor de reacción.

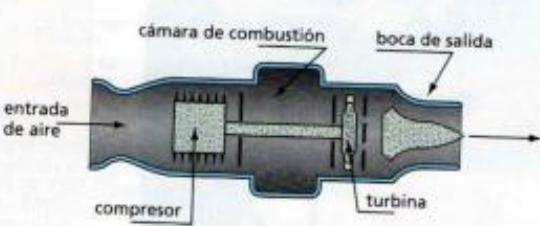


La forma de la hélice crea, al girar, una zona anterior de menor presión que la posterior y, como resultante, una fuerza propulsora hacia adelante.



Fuerza propulsora

El motor de reacción succiona aire por delante y lo lanza a gran velocidad hacia atrás. De acuerdo con el principio de acción y reacción, recibe una fuerza del aire hacia adelante.



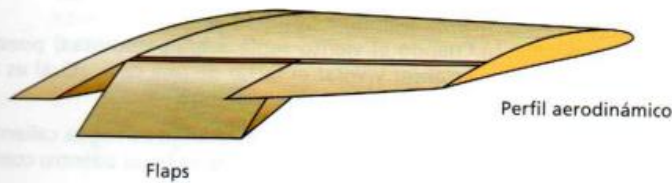
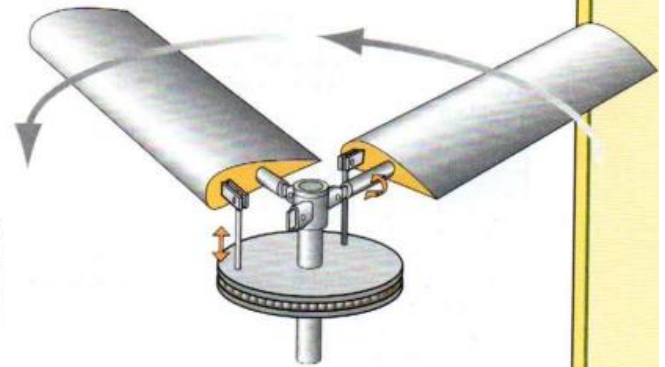
entrada de aire cámara de combustión boca de salida

compresor turbina

Fuerza de sustentación

El diseño aerodinámico hace que el aire que fluye por arriba de la superficie del ala deba recorrer más distancia que el que pasa por debajo. Por lo tanto, el aire por sobre el perfil tiene mayor velocidad que el que viaja por abajo, y, según indica el teorema de Bernoulli, es mayor la presión abajo del ala que por encima. En consecuencia, se produce una **fuerza ascensional dinámica** que ayuda a sostener al avión y que será tanto mayor cuanto más extensa sea la superficie del ala.

En los helicópteros, la fuerza ascensional se consigue girando el rotor de grandes aspas a mucha velocidad.



Para maximizar la sustentación en el despegue, el avión corretea a gran velocidad. Los *flaps* son dispositivos que modifican el perfil del ala, produciendo una sustentación adicional, pero, a su vez, originan una resistencia extra, por lo que requieren aumentar la potencia del motor.

