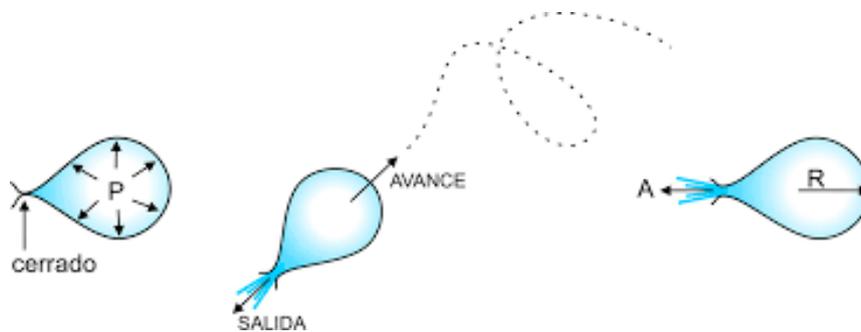


## MOTORES A REACCIÓN

### ***Principio de funcionamiento de un motor a reacción.***

Al inflar un globo generamos un ingreso de aire, pero a su vez, este aire hace que el globo se dilate. La dilatación se produce dado que el ingreso de aire se va acumulando en el interior del globo y al acumularse genera un incremento de presión. Este incremento de presión con respecto a la presión atmosférica va a producir que el globo empiece a aumentar su volumen, de esa forma se va a ir dilatando. En el interior del globo vamos a tener aire confinado a una presión mayor que la presión atmosférica.

En cualquier punto de esta esfera, el globo, si generamos un orificio, el aire que está acumulado en su interior, debido a que posee una presión mayor que la atmosférica, va a tender a salir a fin de igualar presiones.



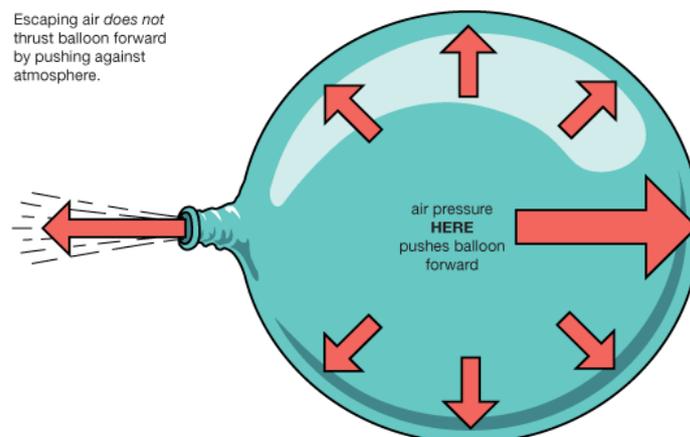
Al salir, se va a producir un desplazamiento del globo. Por principio de Acción-Reacción sabemos que el escape de aire del interior del globo es la acción y la reacción es el movimiento del globo.

El aire acumulado en el interior del globo está a una misma presión, una vez que abrimos algún sector, generaremos el escape del aire acumulado debido a la diferencia de presión que hay entre el interior y el exterior.

Las componentes de presión que están distribuidas en la superficie del globo son iguales pero de sentido contrario y por consiguiente se anulan entre sí (están en equilibrio), pero la componente que está actuando sobre ésta superficie genera una fuerza.

#### **How a jet works**

Escaping air *does not* thrust balloon forward by pushing against atmosphere.



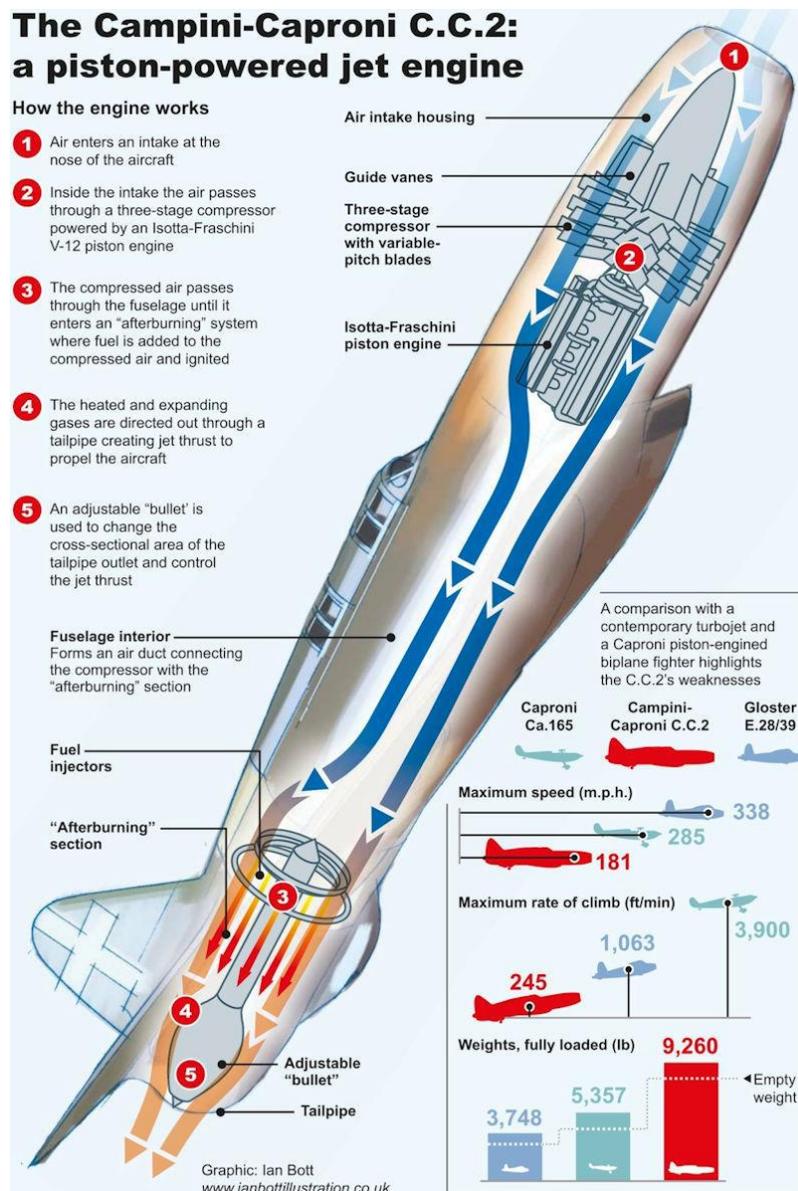
© 2011 Encyclopædia Britannica, Inc.

Esa fuerza es la que produce el desplazamiento del globo. Esta fuerza es la reacción a la acción que está realizando el fluido escapando del interior del globo. Cuanto mayor sea la diferencia de presiones entre el interior y el exterior, mayor va a ser la velocidad de salida del aire y mayor va a ser la acción y también la reacción. Este es el principio de funcionamiento del motor a reacción.

**El motor a reacción funciona debido a que genera una diferencia de presiones entre su interior y el exterior.**

Ante esa diferencia de presión, va a existir un escape de gases que (en esa acción) van a producir una reacción en el interior del motor desplazando al motor. **El motor a reacción es una máquina que genera una zona de alta presión.**

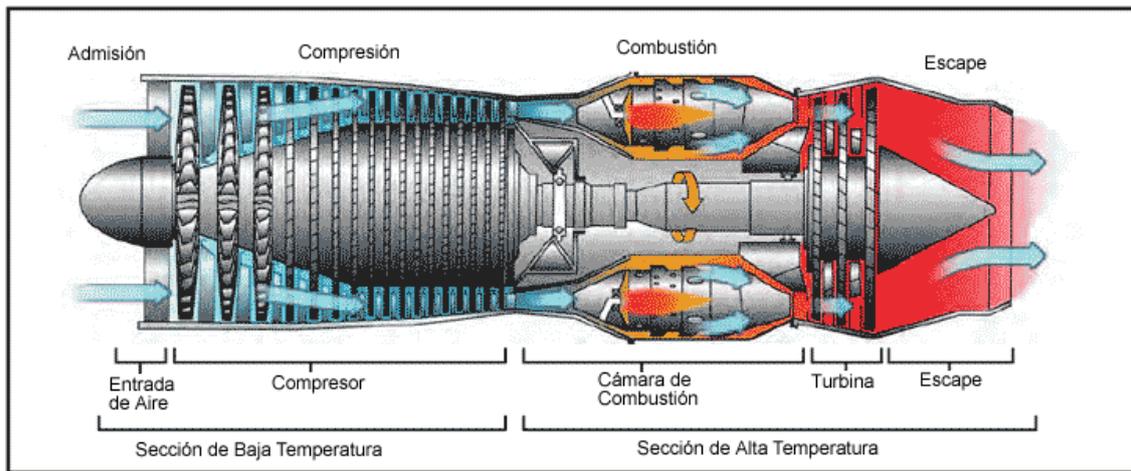
Bajo el concepto de generar una diferencia de presiones, el Ingeniero Campini diseñó el siguiente motor que fue utilizado en la aeronave Caproni. La misma era un motor de pistón que movía un compresor de tres etapas.



Su finalidad era generar una zona de alta presión y luego pasarlo por un postquemador que le aportaba calor, aumentando su temperatura, para luego expandir el fluido en una tobera de escape, a una cierta velocidad de escape.

El concepto era tener una zona de alta presión para poder desplazar aire a alta velocidad y de esa forma generar la acción del movimiento del aire y una reacción en el compresor del motor. Sin embargo, no tuvo un muy buen rendimiento (Año 1940).

### **Motor a reacción moderno**



Así como Campini hizo mover su compresor mediante un motor a pistón, en este caso vamos a mover el compresor con una turbina.

La turbina trabaja como un molino de viento, ellos giran porque el aire pasa a través de sus paletas, reteniendo el aire soplado. El aire es soplado y en su movimiento al pasar a través del molino, lo hace girar. La turbina se mueve porque recibe aire soplado.

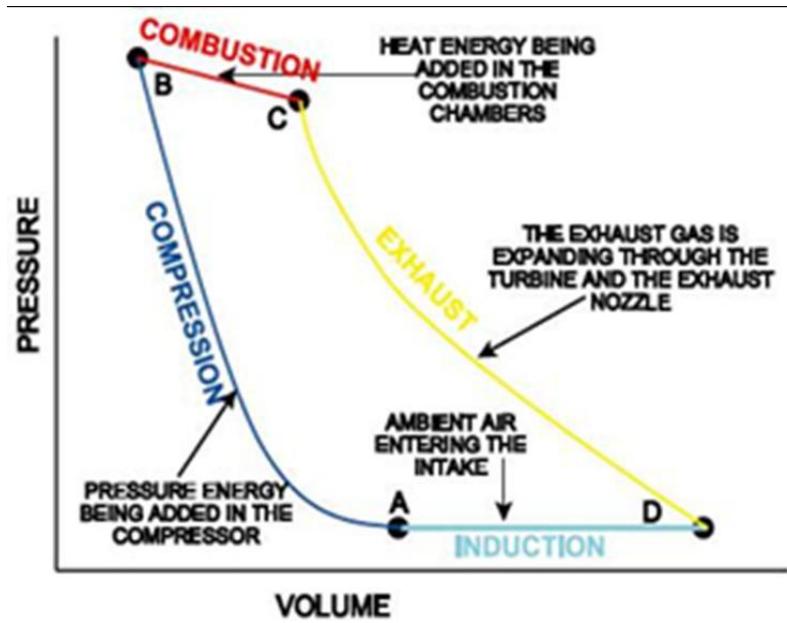
La turbina está conectada a través del mismo eje al compresor. Cuando la turbina se mueve, simultáneamente gracias a este eje, se mueve el compresor. El movimiento de la turbina va a ser el que mueva el compresor. Entonces, el compresor comprime aire, sopla aire, y la turbina recibe aire soplado. Cuando la turbina recibe aire soplado, ésta va a girar. Al girar a través del eje, mueve al compresor y el compresor sopla aire, la turbina recibe el aire soplado y al girar mueve el compresor, de esta manera se produce el ciclo.

A este ciclo de debemos incorporar energía a través de la inyección de combustible que se va a mezclar con el aire soplado por el compresor, y al inyectar el combustible y mezclarse con el aire, lo vamos a encender y calentar el aire. De esta manera produciremos una expansión térmica. Entonces, la energía potencial debida al aire y relacionada con su presión y temperatura, va a pasar a través de la turbina, que la va a transformar en trabajo mecánico. El trabajo mecánico va a mover al compresor.

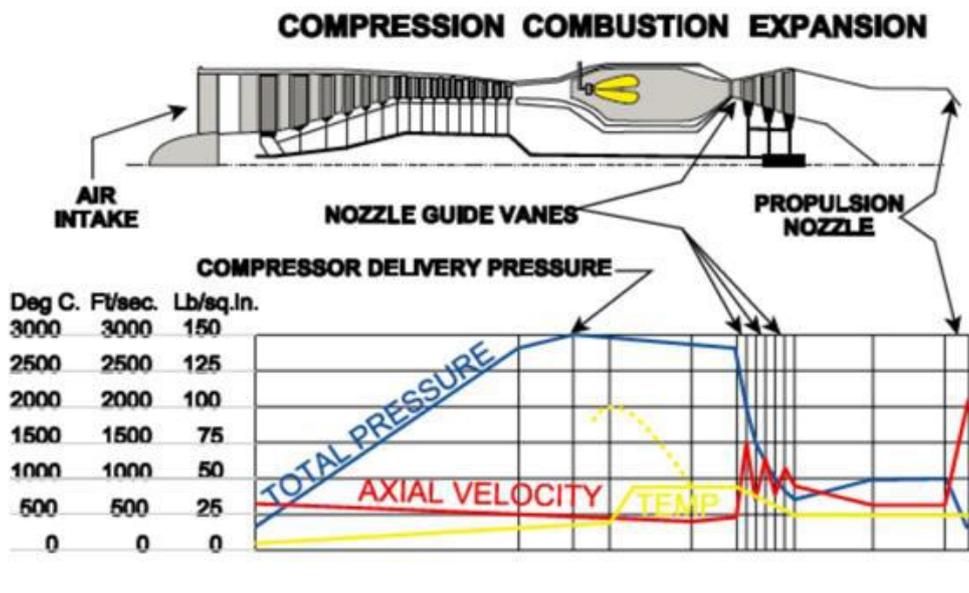
En el motor a reacción tenemos dos sectores, uno de de baja temperatura y uno de alta temperatura. En el sector de baja temperatura tenemos la entrada de aire y el compresor. En el sector de alta temperatura, tenemos la cámara de combustión, la turbina y el escape. Los procesos por los que pasa el fluido dentro del sistema son: la admisión, la compresión, la combustión y el escape.

**Ciclo Brayton**

Este ciclo es el que caracteriza el motor a reacción.



El motor toma aire atmosférico, lo comprime dentro del compresor, le da temperatura dentro de la cámara de combustión, o sea ingresa calor al sistema, lo expande en la turbina y luego lo expande en la tobera de escape hasta llegar a la presión atmosférica.

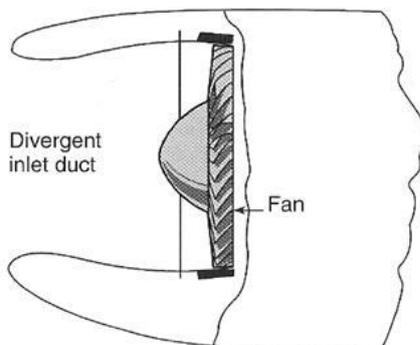


En este grafico vemos como va variando la presión que se incrementa en la zona del compresor y luego disminuye en las etapas posteriores. Tenemos un incremento de temperatura producto de la compresión y luego producto del ingreso del combustible y el encendido de la mezcla obtenemos una variación de la velocidad, en el paso por el interior de la turbina y luego el escape.

Se puede observar un incremento en la velocidad de los gases de escape. Buscamos tener un incremento de velocidad de escape de los gases y de esta manera obtener una alta acción para conseguir una alta reacción.

### Difusor de entrada

La primera parte del motor a reacción que es el difusor de entrada.

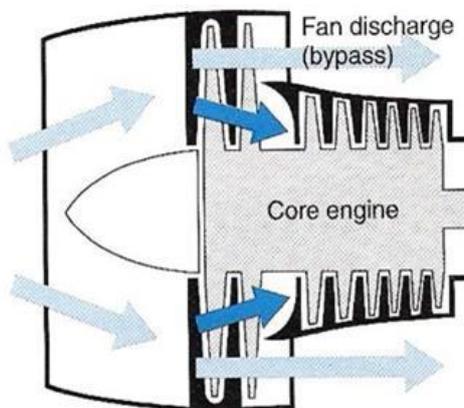


*Conducto de entrada  
divergente subsónico de motor turbofan*

El difusor de entrada busca canalizar el flujo de aire y entregarlo al compresor a una velocidad óptima libre de distorsiones. Esto se logra a través de su forma divergente (incremento del área), y de esta forma la velocidad va a disminuir, dando un valor de velocidad óptimo para el ingreso del aire al compresor. Obviamente, este dimensionamiento está calculado para las condiciones de funcionamiento y rendimiento del motor.

Podemos observar que posee forma aerodinámica, similar a la de un perfil aerodinámico. Lo que se busca es generar una distribución de presiones en este sector tanto del aire que ingresa como del aire que pasa alrededor del carenado o del difusor de entrada, y de esa forma, ante esa distribución de presiones producir sobre la superficie componentes de fuerza en dirección del avance. Se busca generar una pequeña porción de empuje hacia adelante a través de la distribución de presiones generada por el difusor.

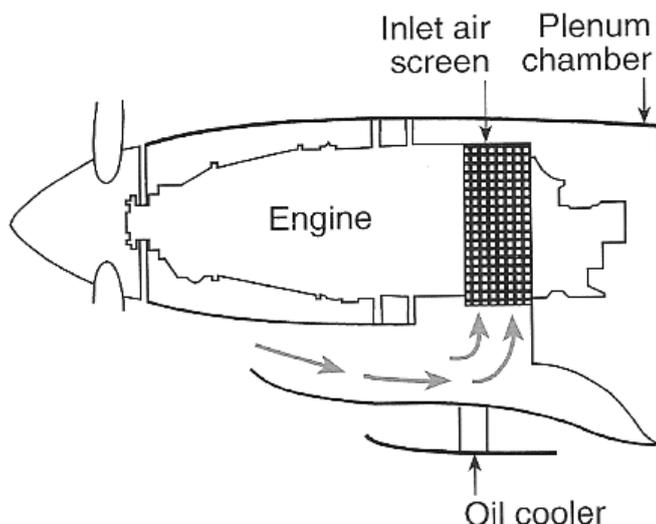
En este caso tenemos el difusor de entrada de un turbofan.



*Conducto de entrada divergente  
usado en motor turbofan de alto índice de  
derivación.*

El fan es un ventilador más grande (un compresor más grande) y aguas abajo el compresor del motor. Parte del aire que ingresa es direccionado hacia el compresor donde este es procesado dentro del motor y otra parte del aire que pasa a través del fan y direccionado al exterior del motor. Al no pasar por el interior del motor, no es calentado, y lo que se busca a través de este fan es producir un incremento de la variación de cantidad de movimiento de una mayor masa de aire y de esa forma producir un mayor empuje.

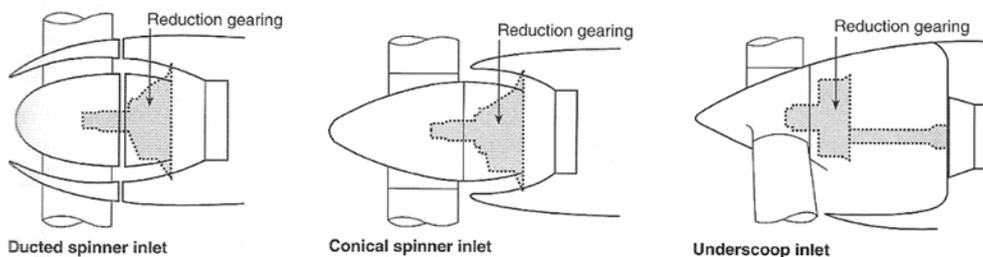
En la siguiente figura visualizaremos el ingreso del aire en un motor turbo hélice:



*El motor turbopropelante P&W (Canadá) PT6 tiene la entrada de aire al compresor en la parte trasera del motor.*

Vemos un difusor, donde el aire va a la parte trasera del motor. De esta manera ingresa el aire en este modelo de motor.

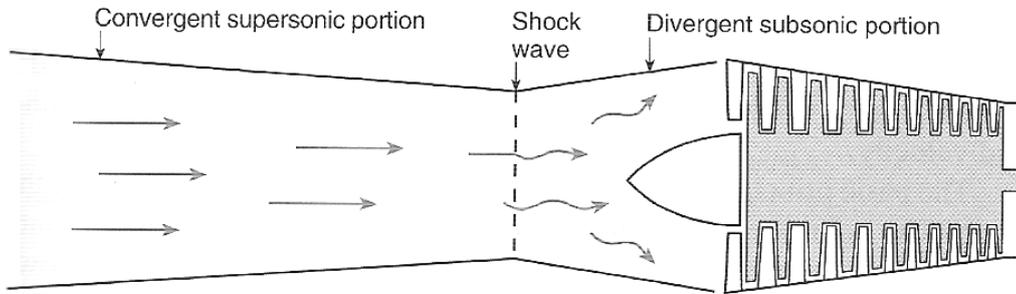
Las siguientes figuras son diversos modelos de difusores para motores turbo hélices:



*Conductos de entrada típicos para motores turbopropelante.*

En el primer caso, la hélice tiene un conducto que direcciona el aire al interior del motor. En el segundo caso, tenemos el ingreso del aire, el difusor de entrada, luego el aire va al compresor. También, tenemos el reductor que hace que la hélice vaya a rpm menores que el motor. En el tercer caso, el ingreso del aire es a través de una boca, en la parte inferior.

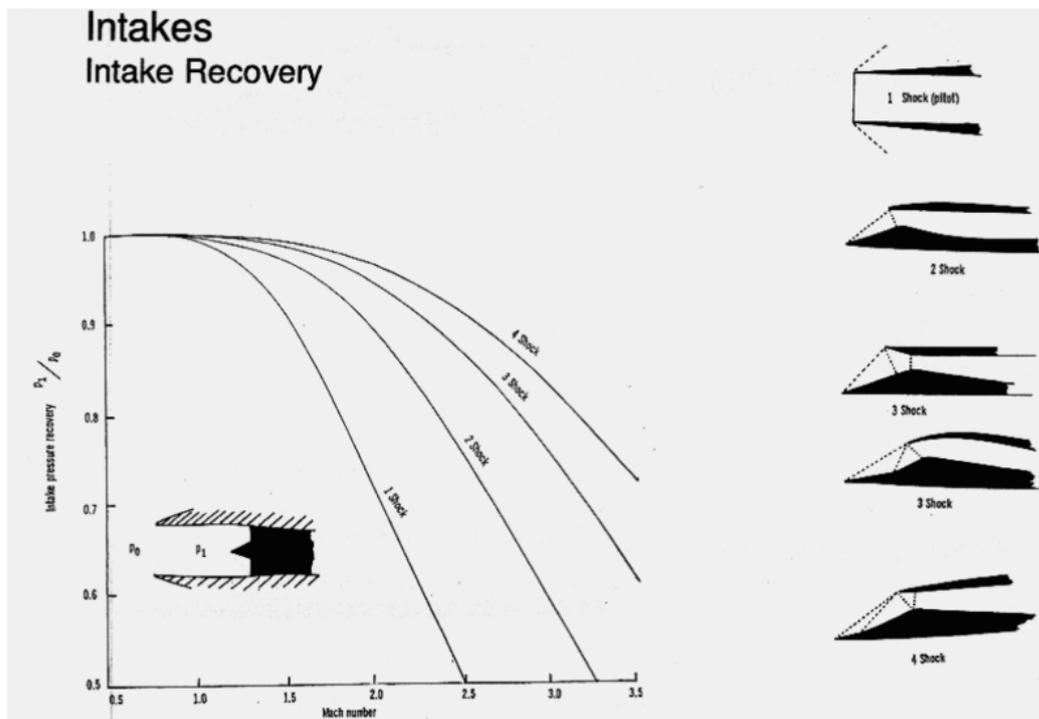
**Difusores de entrada para motores de aeronaves supersónicas**



*El aire de entrada supersónico se decelera hasta Mach 1'0 en la zona convergente del conducto de entrada, formándose una onda de choque. A partir de la onda de choque el movimiento del aire es subsónico y sufre una mayor deceleración en la zona divergente del conducto de entrada antes de entrar en el compresor.*

En este caso se busca generar una onda de choque normal a la dirección de flujo en la zona de garganta del difusor. Dado que siempre aguas abajo de una onda de choque normal el valor de velocidad es subsónico (velocidad menor a la velocidad del sonido) este motor puede operar en una aeronave que vuela a una velocidad mayor que la del sonido sin afectar su funcionamiento. El difusor de entrada supersónico tiene una forma convergente y luego divergente para dar una canalización y una velocidad óptima de ingreso del fluido al motor.

**Tipos de diseños**



Ing. Aer. Claudio Movilla  
Ing. Aer. Gustavo Solier

Ing. Aer. Roberto García  
Ing. Aer. Rodrigo Zaguir

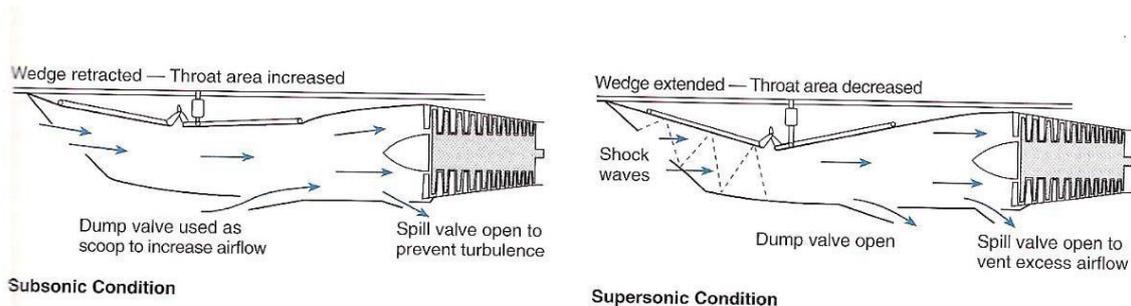
En el primer caso generamos una onda de choque normal. En el segundo caso obtenemos una onda de choque oblicua seguida de onda de choque normal. El fluido ingresa y se desvía. Al desviarse se encuentra con una onda de choque normal que es perpendicular al movimiento del fluido. A partir de esta etapa tenemos divergencia dado que el flujo ya es subsónico.

Lo mismo se produce en el tercer caso, una onda de choque oblicua, una primer onda de choque recta, una segunda onda de choque recta y divergencia para tener disminución de velocidad, porque el flujo después de tener una segunda onda de choque recta es subsónico.

En el tercer caso, tenemos dos ondas de choque oblicuas seguida de una onda de choque normal y luego divergencia porque el fluido es subsónico.

Entonces, en un avión que vuela a velocidades supersónicas, la velocidad de ingreso del aire al motor siempre va a ser subsónica. El diseño del difusor de entrada debe tener dimensiones tales que provoque que el aire que ingresa al compresor tenga velocidad subsónica. Esto se logra a través del manejo de la generación de diferentes ondas de choque.

Observamos el diseño de un difusor de entrada para una aeronave vuela en condiciones subsónicas y supersónicas:

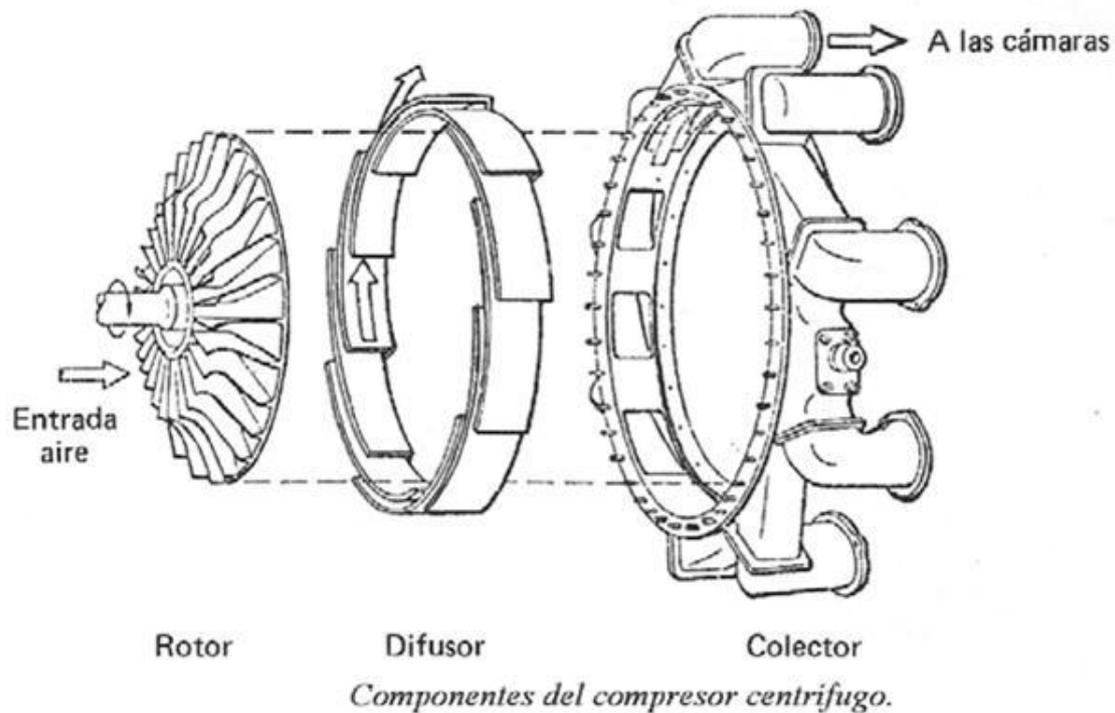


*El Conducto de Entrada variable de cuña móvil decelera el flujo de aire supersónico hasta una velocidad subsónica, forzándole a fluir a través de una serie de ondas de choque oblicuas y finalmente a través de una onda de choque normal.*

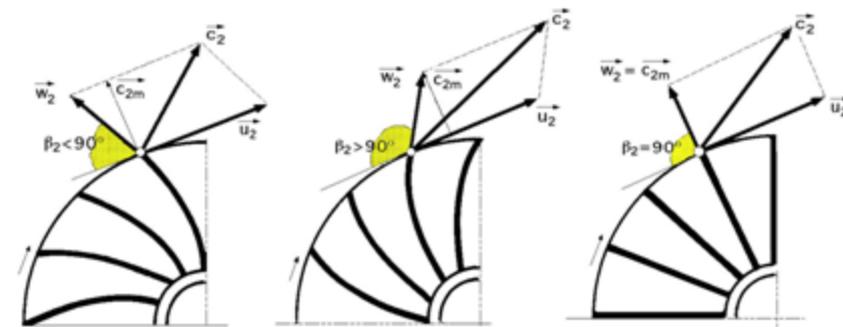
Hay una condición supersónica en la que se produce el estrechamiento a través de este actuador. Al producirse esa variación en las dimensiones interiores se producen las ondas de choque que habíamos comentado donde, por cada una de ellas produce un salto de presión y velocidad hasta que se llega a una condición de divergencia donde va a disminuir mucho más la velocidad del fluido para luego llegar en condiciones óptimas e ingresar al compresor. En vuelo subsónico no es necesario la generación de ondas de choque es por esto que no se produce un estrechamiento de las dimensiones del interior del difusor.

### **Compresor Centrífugo**

Los compresores en motores a reacción pueden ser de dos tipos: el compresor centrífugo y el compresor axial.



En los compresores se producen incrementos de presión, saltos de presión en lo que se denomina etapas del compresor. En el caso de un compresor centrífugo, cada etapa está compuesta por tres elementos: un rotor, un difusor y un colector. El rotor es una rueda que tiene aletas que producen un cambio de dirección de  $90^\circ$  del fluido. A estas aletas se las denomina alabes. El fluido ingresa axialmente, paralelo al eje de giro del rotor, rebota contra la pared, gira  $90^\circ$  y sale del difusor en forma radial.

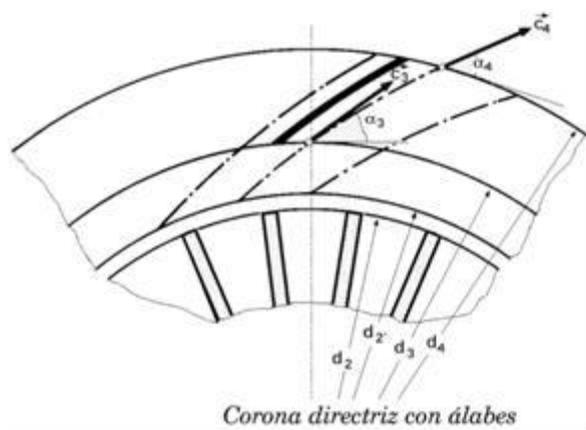


En el primer caso, tenemos el eje, el flujo gira  $90^\circ$  y sale en forma radial de rotor. La componente radial del aire se la denomina  $w_2$ . A su vez, el rotor está girando, tiene un sentido de rotación horario, generando un viento relativo. La suma de las dos componentes de velocidad genera una resultante. Entonces, debido a la forma de los alabes en el caso 1, la componente radial con respecto a la componente tangencial, tiene un ángulo  $\beta_2$  menor a  $90^\circ$ .

En el segundo caso, por la forma que tienen los alabes hace que este ángulo entre la tangente y la componente radial sea  $\beta_2$  mayor a  $90^\circ$ . Entre la componente tangencial y la componente radial vamos a tener una resultante distinta.

Y para el tercer caso, donde los alabes no tienen ningún tipo de curvatura sino que son rectos, nuestra componente radial con respecto a la tangente es  $\beta_2$  igual a  $90^\circ$  y sumada a la componente tangencial nos da por resultado una nueva velocidad del fluido.

Las tres son velocidades del fluido y varían en función de la curvatura que tiene el alabe del rotor. Ahora bien, las formas son divergentes. El fluido cuando gira  $90^\circ$  y se posiciona dentro del conducto dado por la distancia entre los dos alabes. Este conducto es un conducto divergente, por lo que disminuye la velocidad del fluido, si disminuye la velocidad del fluido lo que produce es un aumento de presión. Ahora, este fluido va a pasar por el difusor que es de forma divergente, la distancia de separación entre alabes es mayor al final del conducto.

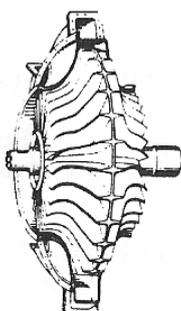


Por ser divergente el conducto va a hacer que disminuya la velocidad del flujo. Al disminuir la velocidad, va a aumentar la presión. En conclusión, tenemos un aumento de presión por la divergencia del rotor y un aumento de presión producto de la divergencia que se da en el difusor.

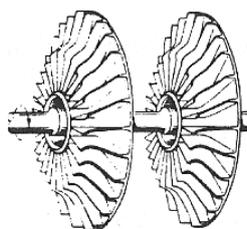
A partir de ahí el flujo pasa por el colector, que lo hace nuevamente girar a  $90^\circ$ , lo direcciona nuevamente en el eje para que se desplace paralelamente al eje del motor y a partir de ahí pasa a la cámara de combustión.

Tenemos entonces el ingreso del aire al rotor, gira  $90^\circ$  hace un proceso de desaceleración en el rotor, un proceso de composición con la velocidad tangencial y nuevamente un proceso de disminución de velocidad en el difusor. A partir de ahí pasa por el colector, haciéndolo girar  $90^\circ$  y volviéndolo a poner en dirección paralelo al eje del motor, a partir de ahí se conduce a la cámara de combustión.

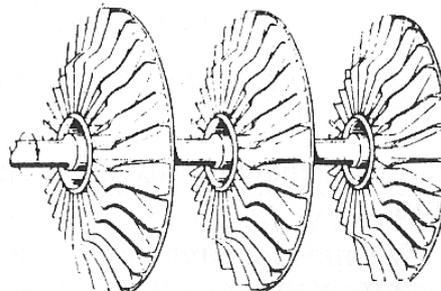
### Tipos de compresores



*Doble cara.*



*Doble compresor*



*Triple compresor.*

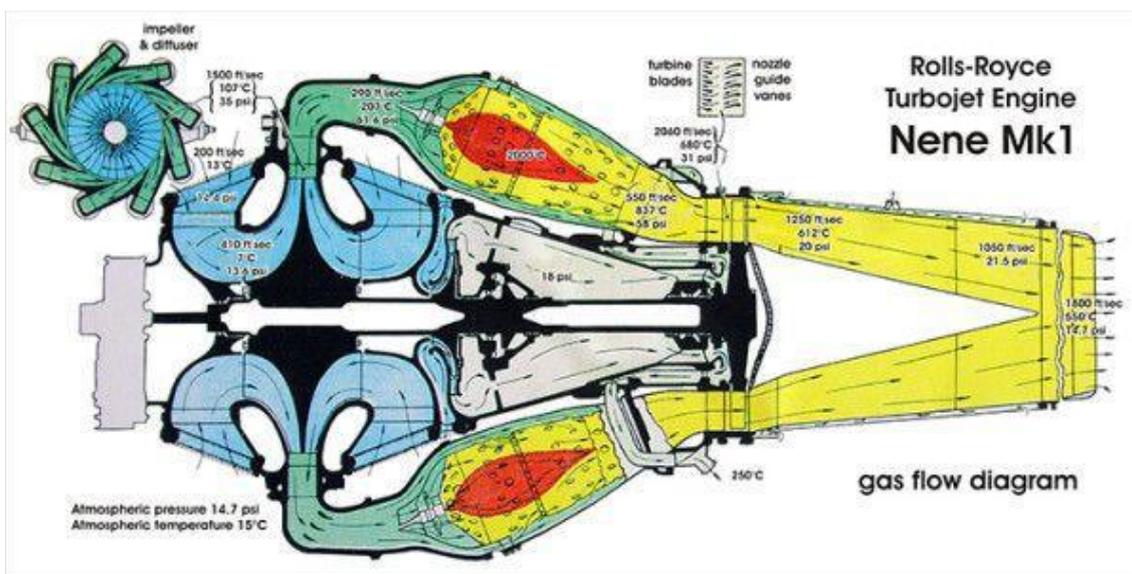
*"Impellers" de distintos tipos de compresores centrifugos.*

En el primer caso, tenemos un rotor de doble cara, el compresor es simétrico por lo cual no significa que esto sea de doble etapa, sino que es un compresor que tiene dos caras, el fluido va a ingresar por ambos lados y como resultado se va a obtener el mismo proceso explicado anteriormente.

En el siguiente caso, sí tenemos distintas etapas, tenemos dos etapas: una vez que sale por el difusor pasa por el colector y se lo vuelve a direccionar para que ingrese al segundo rotor. Repite el proceso, sale en forma radial del rotor, se compone con la tangencial y vuelve a pasar por un segundo difusor y colector.

En el tercer caso son tres etapas, porque es compresor triple.

Un Ejemplo de un motor que utiliza un rotor de doble cara en el compresor centrífugo es el Rolls-Royce Nene Mk1.

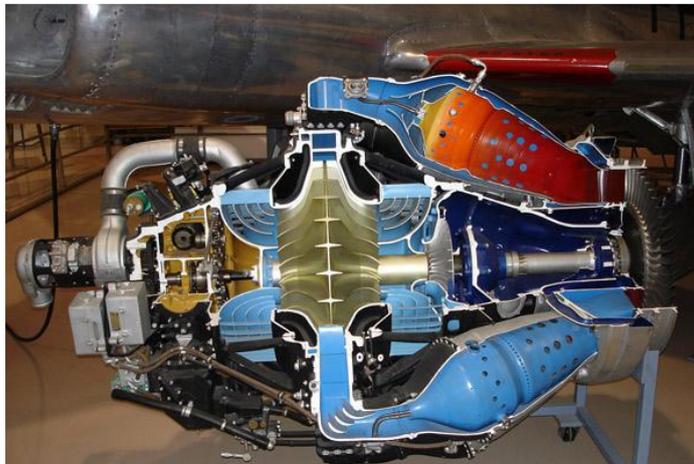


En este esquema de rotor doble cara, tenemos la cara delantera y la cara trasera. El ingreso de aire es delantero y trasero.



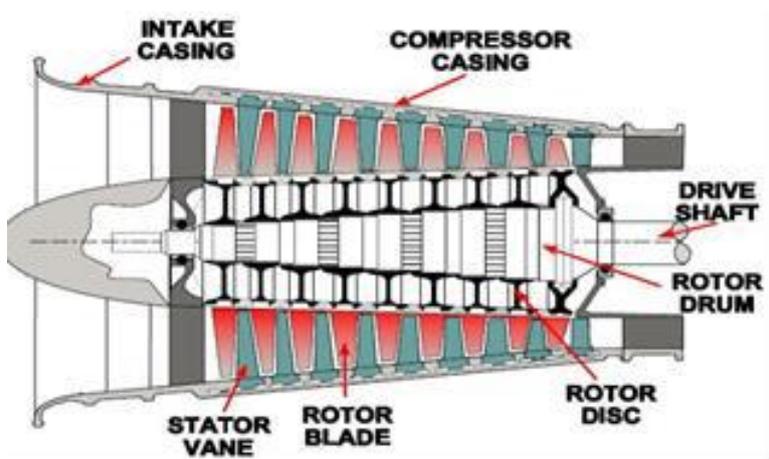
La rejilla corresponde al ingreso de aire delantero y también de ingreso de aire trasero. De ahí pasa al rotor de doble cara, luego al difusor, al colector y por último a la cámara de combustión.

Entra el aire, pasa al rotor, difusor, colector que lo direcciona en la dirección del eje del motor, a la cámara de combustión, turbina y de ahí a la cámara de escape.



### Compresor axial

Se lo denomina axial porque el fluido va a realizar todo su proceso de compresión en forma paralela al eje del motor.



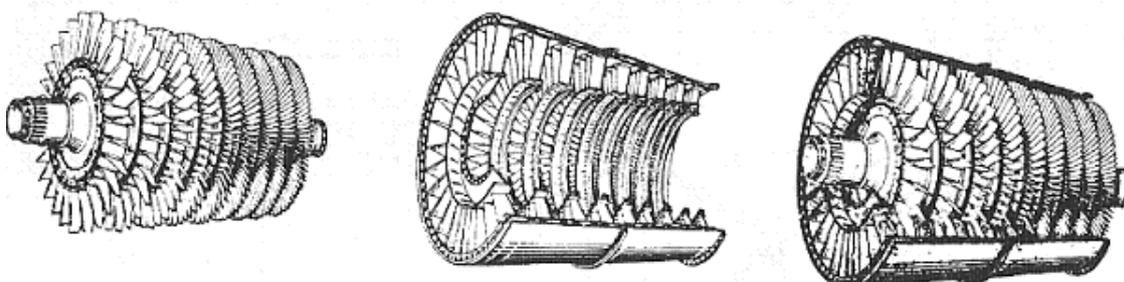
La etapa de compresión está compuesto por alabes rotores y alabes fijos. Los alabes rotores son aquellos que están montados sobre el eje del motor, son móviles y los alabes fijos están montados sobre la carcasa que recubre al compresor. De acuerdo al gráfico los alabes de color

Ing. Aer. Claudio Movilla  
Ing. Aer. Gustavo Solier

Ing. Aer. Roberto García  
Ing. Aer. Rodrigo Zaguir

verde son fijos, montados en la carcasa, y los alabes de color rojo son rotores, giran junto con el eje del motor.

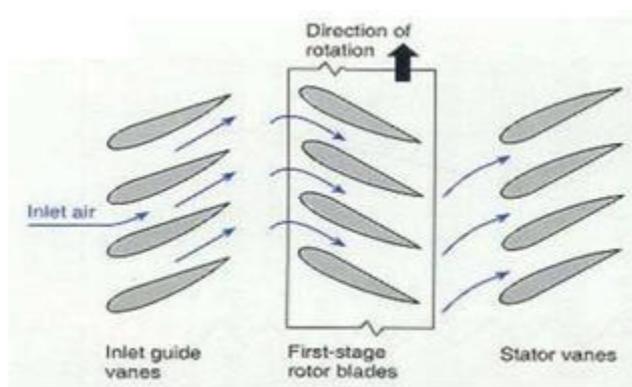
Vemos el conjunto de alabes rotores y el conjunto de alabes estatores que se van intercalando y generando las etapas del compresor entre cada uno de ellos. Una etapa está compuesta por un disco rotor y uno estator.



### *Componentes del compresor axial.*

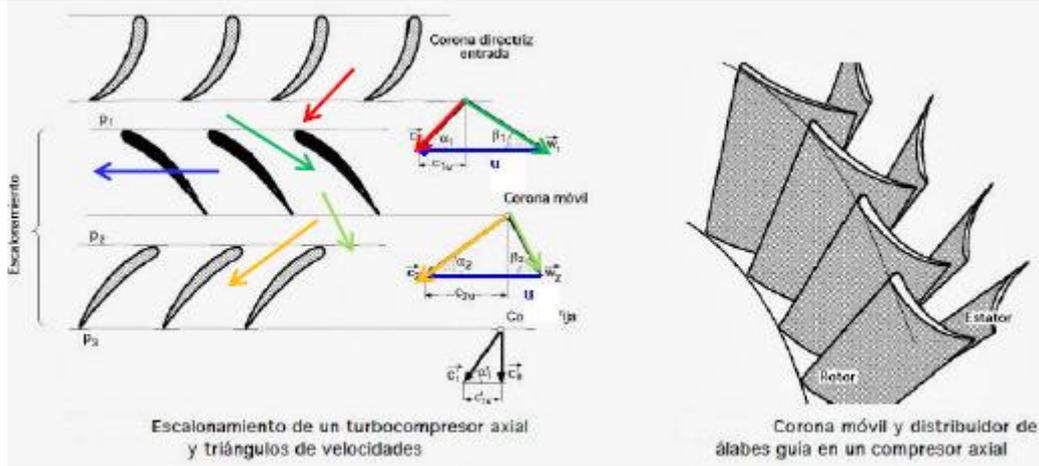
#### Proceso de compresión

Primero tenemos alabes guías fijos, que van a direccionar el fluido hacia el interior del motor, y se van a encontrar con una corona de alabes móviles con un determinado sentido de movimiento rotacional. De ahí sale el fluido de los alabes móviles y se encuentran con los alabes fijos.



El proceso de compresión se produce en función a la variación de velocidad que se le va dando al fluido, y la variación de velocidad se da a través de sumatoria de velocidades de viento relativo y variaciones de velocidad en conductos difusores divergentes.

Como conclusión, para comenzar primero tendremos una corona de alabes directrices, fija, por la cual ingresa el fluido, de ahí se va a encontrar alabes que están en movimiento (la flecha indica el sentido del movimiento de los alabes). Este es el disco que rota con el eje del motor. Al moverse en este sentido, producen un viento relativo en sentido contrario.



Ejemplo: si voy en motocicleta y me desplazo hacia adelante, siento un viento relativo hacia atrás. Entonces, si estos alabes se mueven en el sentido indicado, el viento relativo que ellos generan es en sentido contrario.

El vector azul es el viento relativo que ellos generan. El fluido tiene una velocidad determinada por el vector rojo y se encuentra con el vector azul, dando por resultante el vector verde oscuro.

El vector verde oscuro es el que ingresa en el conducto formado por dos alabes que rotan, móviles. Pero cuando gira y sale, tiene una forma divergente. El hecho de encontrarse con ese conjunto divergente hace que el vector verde oscuro disminuya su velocidad y se convierta en otro verde claro.

Ahora, supongamos que estamos parados en los alabes negros y nos estamos moviendo junto con ellos. Relativamente estamos quietos junto con el alabe. Ese movimiento relativo, hace que nosotros percibamos que los alabes fijos estén en movimiento con respecto a nosotros. Ese movimiento relativo va a producir un nuevo viento relativo. Para nosotros, nos movemos en el sentido indicado por el vector azul y los álabes fijos se están moviendo en sentido contrario pero con la misma magnitud del vector azul. Estos alabes son fijos y nosotros nos movemos.

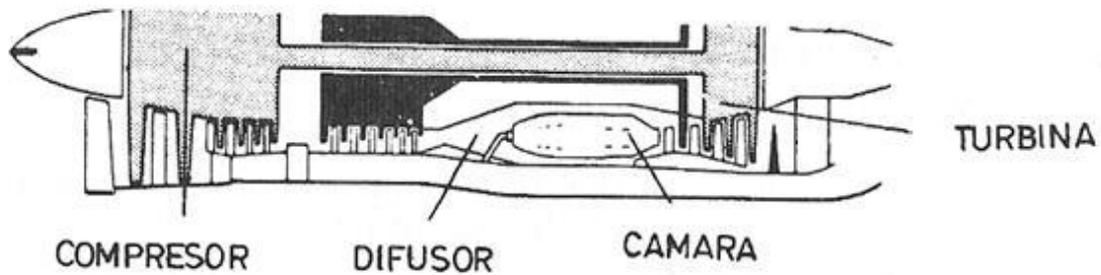
Al producirse ese efecto, tenemos un nuevo viento relativo que se produce en el sector medio y en sentido contrario del vector azul. El fluido venía con la velocidad del vector verde claro, se le suma este viento relativo producto de nuestro movimiento relativo, o sea del movimiento relativo de los alabes móviles con respecto a los fijos y dando por resultado un nuevo vector amarillo.

Se produjo un incremento de la velocidad y por ende un incremento de presión dinámica pero nuevamente este vector amarillo va a pasar por un conducto divergente. Entonces al pasar por este conducto divergente disminuye su velocidad y aumenta la presión.

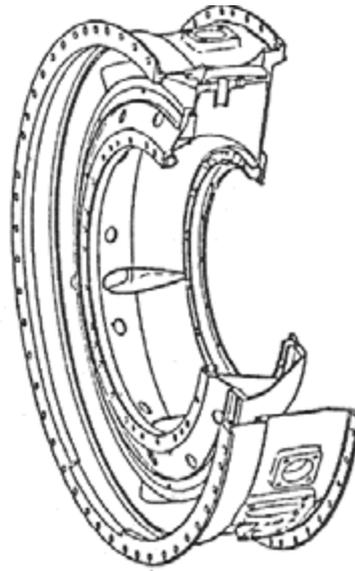
En resumidas cuentas, a lo largo de una etapa de compresor hemos tenido distintas variaciones de presión que fueron en incremento.

### Carter difusor

Una vez que salimos del compresor, el fluido va a pasar al cárter difusor. Tiene forma divergente, y va a hacer que el fluido tenga una velocidad adecuada para que el combustible pueda ingresar a la cámara de combustión.



*Difusor post-compresor (o difusor pre-cámaras).*



*Difusor post-compresor.*

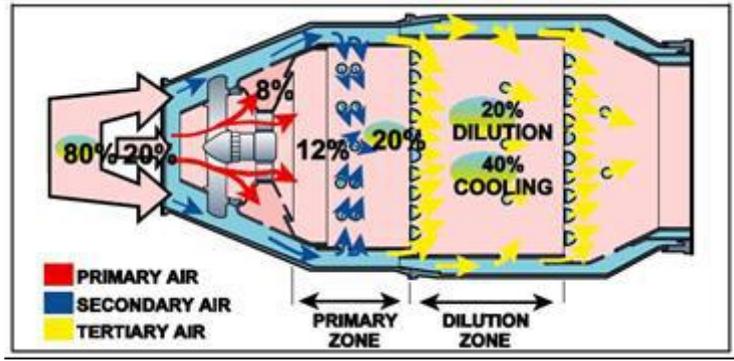
A su vez tiene conductos de salida, para poder tomar aire en ese sector; aire que este comprimido y a temperatura, y su finalidad es la de ser utilizado en distintos sistemas. Sistemas anti hielo, de reversor de empuje, distintos tipos de adaptadores. La finalidad ahora es la de llevar el fluido, direccionarlo hacia la cámara de combustión.

### Cámara de Combustión

Dentro de las cámaras de combustión también tenemos distintos diseños.

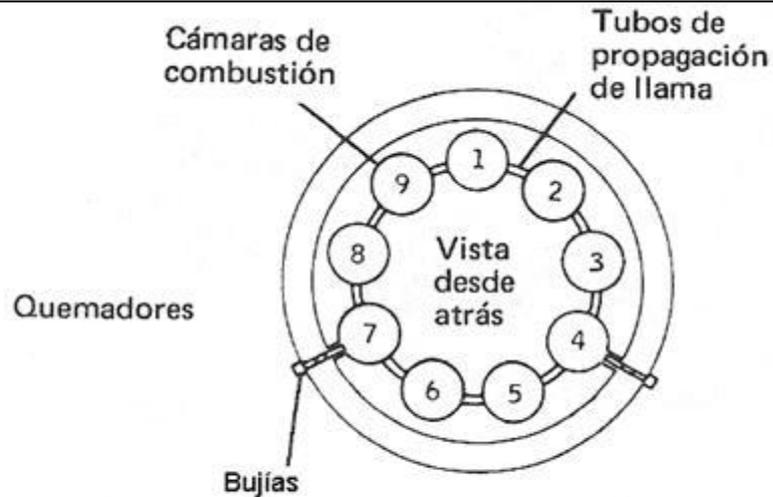
#### Cámara de combustión individual

Esta compuesta por dos carcasas, una interior y una exterior, totalmente abiertas y comunicadas entre sí por diferentes orificios. Donde dentro de ella hay un inyector de combustible.

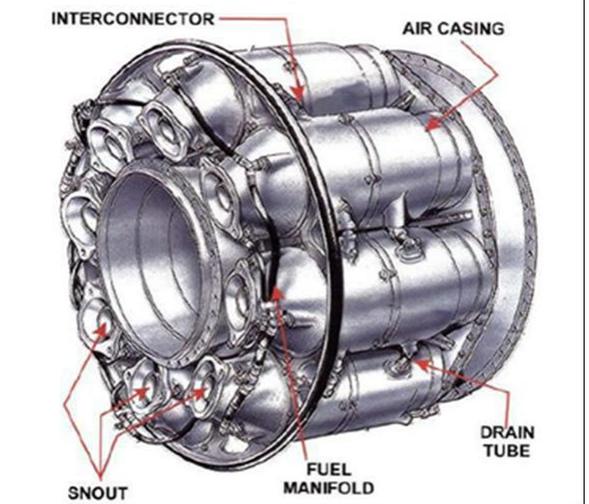


El aire viene del compresor por el sector azul, una parte del aire, el aire primario es el que se va a poner en contacto directamente con el inyector y la mezcla va a mantenerse constantemente encendida como un mechero. El aire secundario va a terminar de mezclarse con el combustible que no fue quemado en un principio. Obviamente, se quema, pero la idea es que no quede remanente de combustible sin quemar, y producir una mezcla estequiométrica con el aire/combustible. Existe una tercer parte del aire que es la que termina de combinarse con lo que reste, su función principal es la de refrigerar la cámara de combustión.

Las cámaras de combustión individuales están conectadas entre sí a través de conductos para mantener siempre la llama encendida.



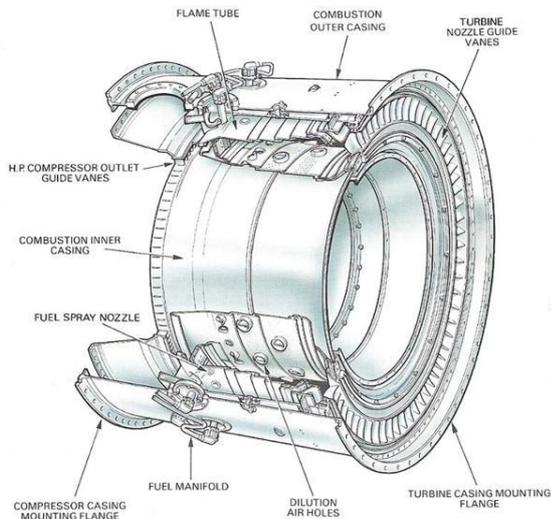
*Disposición de cámaras individuales.*



La ventaja que tienen es que son de fácil mantenimiento; si se tiene una novedad con alguna de ellas se retira la cámara de combustión y se repara o se cambia por una nueva. El hecho de que sean individuales le da esa ventaja. La desventaja es que cada una de ellas produce puntos de alta temperatura. Aunque cada uno de ellos pareciera que tiene una temperatura uniforme, la realidad es que en el centro de cada una de ellas se tiene la temperatura máxima; estos son puntos de concentración alta temperatura.

En este tipo de cámara de combustión la temperatura no es completamente uniforme. Abajo tenemos la turbina, con sus perfiles alares al igual que como vimos en el compresor. Estos se denominan álabes de turbina y esos álabes van a recibir calor cada vez que pasen por una de estas cámaras de manera no uniforme, van a ir teniendo variaciones de temperatura. La principal desventaja que tienen este tipo de cámaras es que se va a producir fatiga térmica con el tiempo.

**Cámara de combustión anular**



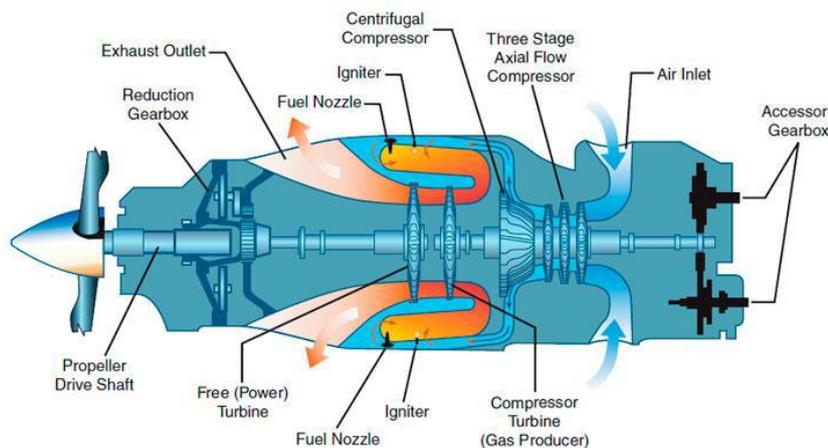
*Cámara de combustión anular.*

Este tipo de cámaras tiene forma de anillo. No son individuales, sino que es un anillo que está colocado alrededor del eje del motor. También tiene inyectores, un aire primario, uno secundario y uno terciario, pero la ventaja es la distribución de temperatura es mucho más pareja. Por lo tanto, no se genera el efecto de fatiga térmica a los alabes de turbina en comparación con las cámaras de combustión individuales.

En este caso del motor de la figura, tenía los inyectores puestos en el eje, entonces cuando giraba (el conducto es perpendicular al eje) el combustible por el eje iba haciendo un remolino y dado ese remolino, la distribución de mezcla era mucho más pareja, por ende la distribución de temperatura también mucho más pareja. La desventaja que tiene este tipo de cámara es que hay que desarmar el motor para poder retirarla; al ser como es un anillo, el eje está pasando dentro de ella, y hay que desarmar toda la zona de la turbina para hacer reparaciones en esta cámara.

**Cámara de combustión anular de flujo inverso**

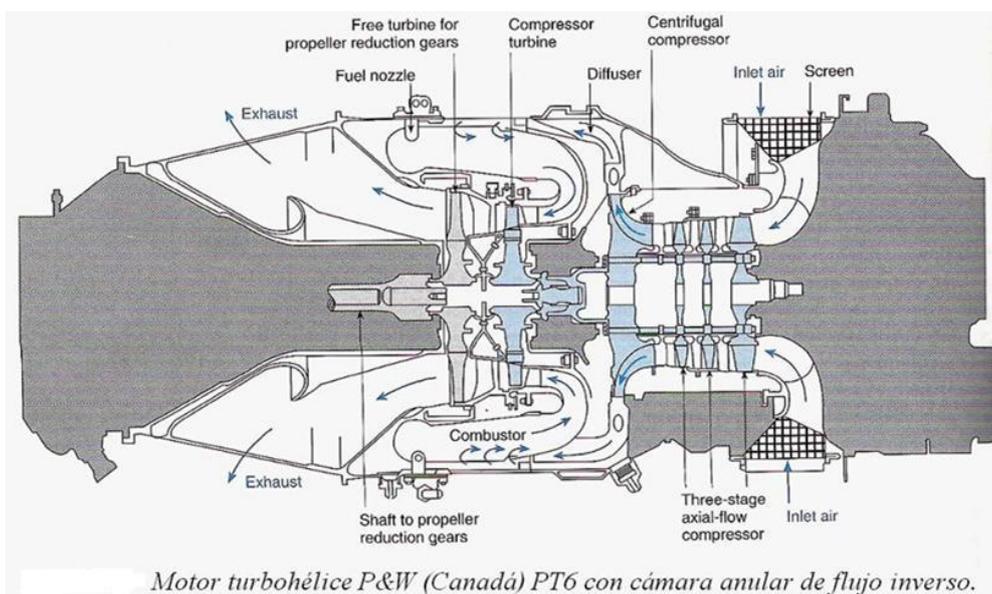
Este es un diseño muy especial, de cámara de combustión, que es una cámara anular, pero de flujo inverso.



Tenemos la hélice del motor y el reductor de la hélice. Sin embargo, el aire ingresa por la sección trasera donde tenemos el compresor. El compresor tiene una etapa axial seguida de una etapa centrífuga, luego el aire gira y se mete dentro de la cámara de combustión, hace todo el recorrido, pasa por la turbina y sale.



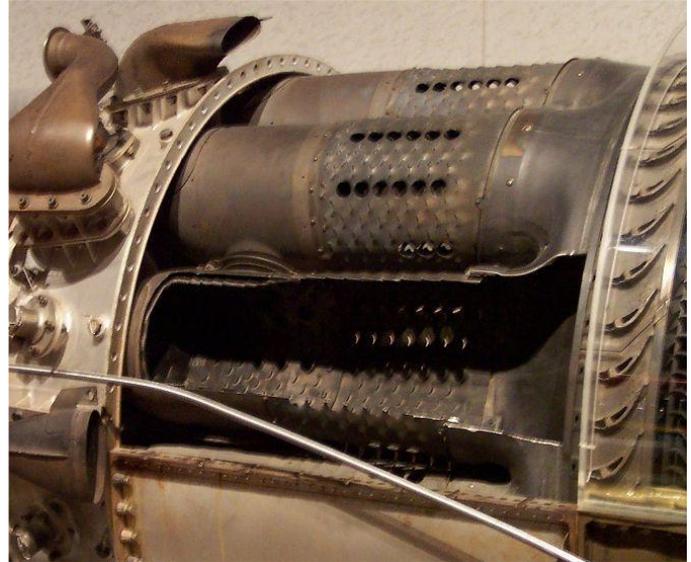
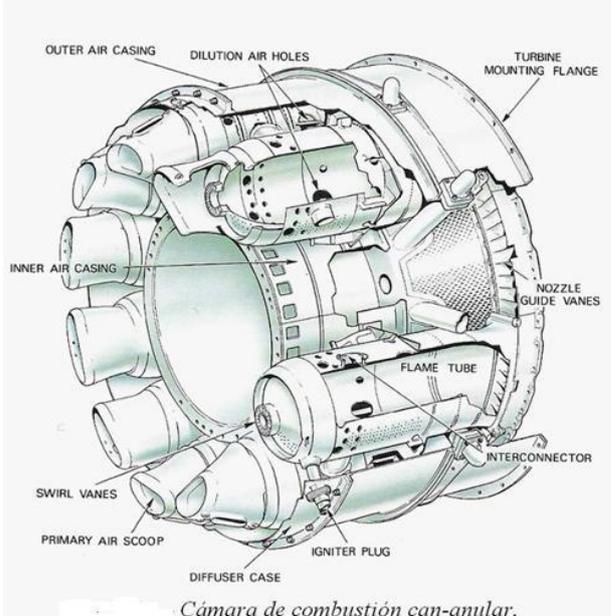
El aire ingresa por la rejilla de ingreso del aire, pasa por el compresor axial, por el compresor centrífugo; de este último compresor pasa al difusor, al colector dirige el fluido a la cámara anular, va a la turbina que va a manejar a los compresores y pasa por la segunda turbina, que está desacoplada (no tiene el mismo eje), y esta turbina (que es por donde pasa el fluido, por la segunda turbina) es la que a través de este eje mueve la caja reductora y de ahí mueve la hélice.



En este gráfico también vemos el desacople de las dos turbinas. El aire ingresa por la rejilla, esquema de dibujo del compresor axial, esquema de dibujo del compresor centrífugo, el conducto que lleva a la cámara de combustión, el aire se combina con el combustible y se expande por la temperatura, va a la turbina, que esta turbina en color celeste es la que mueve al compresor centrífugo y al compresor axial desacoplada, no tiene el mismo eje. El fluido que pasó por la turbina del motor ahora va a la segunda turbina que es la de color gris, que tiene su propio eje que va a mover a la hélice, y de aquí sale al exterior.

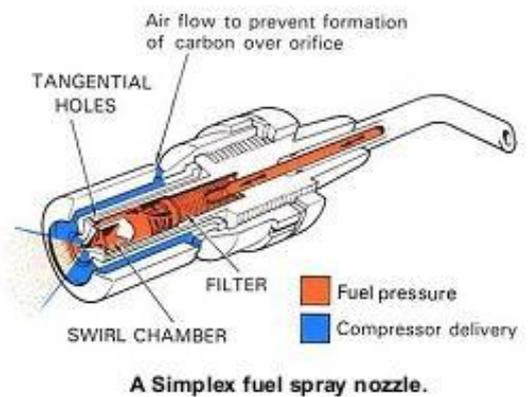
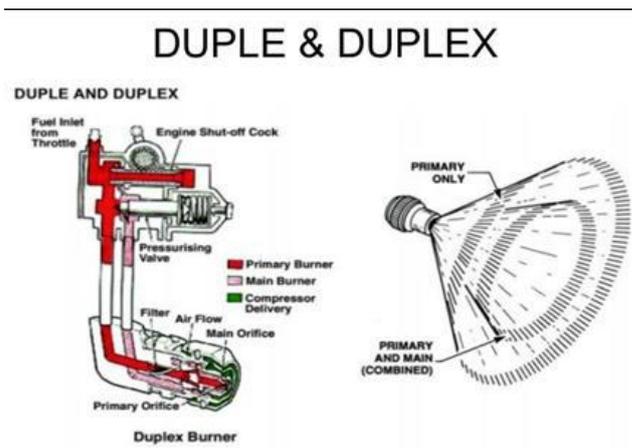
### Cámara de combustión Can Anular

Por último, tenemos la cámara can anular, que es una combinación entre lo que vimos de la cámara anular y las individuales. Son cámaras individuales que están dentro de una cámara anular pero que no tiene acceso fácilmente a poder repararlas.



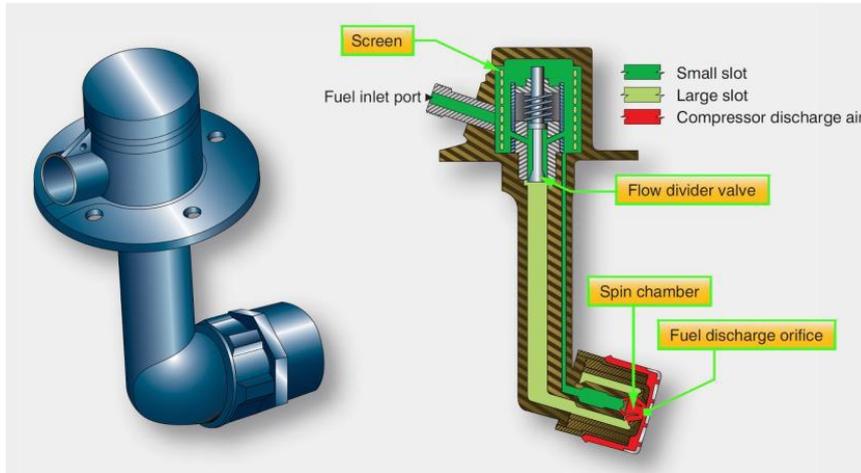
### Cámara de combustión - inyectoros

Los inyectoros de combustible buscan hacer un spray lo más disperso posible para lograr una combustión pareja de la mezcla.



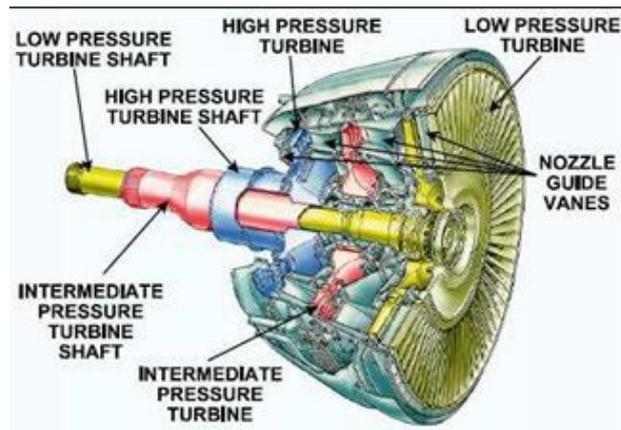
La mayoría de los inyectoros actuales tienen dos tipos de funcionamiento dependiendo del número de rpm. Cuando el motor está en ralentí y hasta un cierto número de rpm el inyector va a trabajar con una condición de cono de spray amplio para mantener una buena ignición y mantenimiento de llama. Cuando se desea incrementar las rpm, es necesario aumentar el caudal de combustible y con esto la temperatura de llama. Para que esto ocurra es necesario cerrar el cono de inyección para alejar la llama de las paredes de la cámara de combustión.

Para producir los dos tipos de conos, el inyector tiene dos conductos de combustible diferentes y en función de por donde pasa el combustible es como se va a producir el cono de spray.

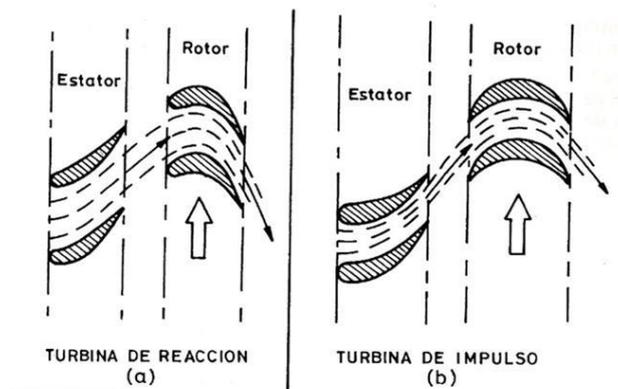


A su vez, se utiliza aire que proviene del compresor para evitar la formación de carbón en los orificios del inyector.

### Turbinas



En las turbinas tenemos una situación semejante a la del compresor. Tenemos una zona de alabes fijos y una zona de alabes móviles conformando una etapa de turbina.

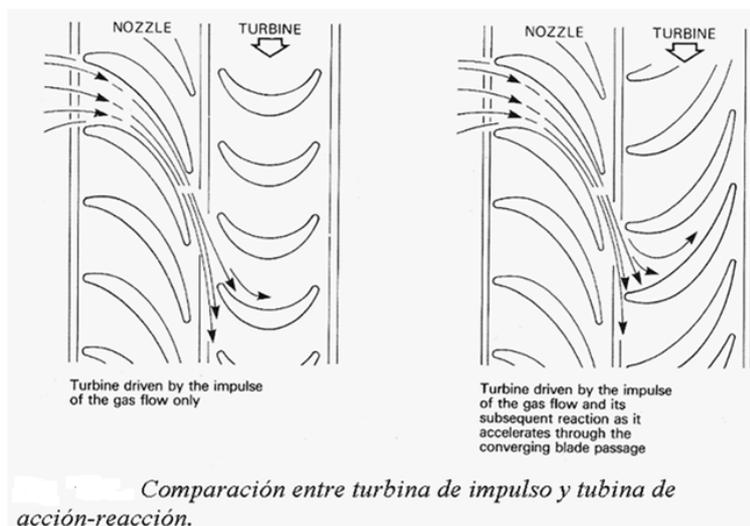


*Turbinas de reacción y de impulso.*

Tenemos dos tipos de diseño: la turbina de reacción y la turbina de impulso. La diferencia está dada por la forma aerodinámica que tienen los álabes. Los que están en las de reacción como en la de impulso los álabes estatores toman una forma convergente. Eso hace que el fluido cuando ingresa por el conducto que forman dos álabes se acelere, tanto para la de impulso como para la de reacción.

Ahora, cuando pasan por la sección rotora, los álabes sí tienen diferente forma. La de impulso tiene una forma de meñisco, tiene una forma simétrica, una forma simétrica de curvatura, mientras que el otro tiene forma aerodinámica. La forma aerodinámica también genera un conducto convergente y se estrecha. Obviamente acá también se produce una aceleración, y el hecho de que se provoque una aceleración hace que el fluido salga con mayor velocidad, y esa mayor velocidad va a hacer que genere un mayor movimiento a estos álabes rotores. De esta manera se busca es una mayor acción para tener una mayor reacción. En las de impulso, la acción es más pareja, pero indudablemente se produce una reacción o un impulso que es el desplazamiento de los álabes en el sentido indicado.

Los álabes rotores, en su mayoría, utilizan en su diseño una determinada sección con forma de perfil de turbina de impulso y en otra de turbina de reacción.



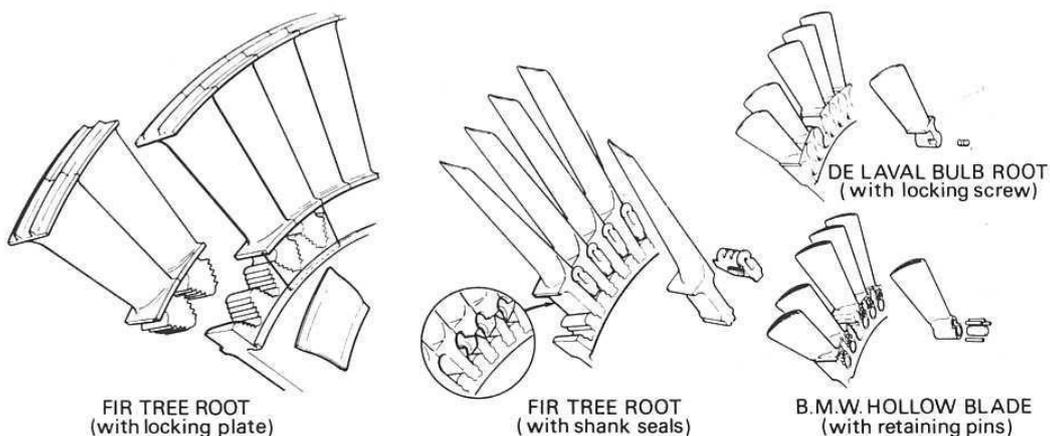
En el caso de la turbina de impulso tienen mayor espesor por la forma de meñisco y los álabes de reacción tienen menor espesor, el mismo va disminuyendo.

Entonces, en la raíz de la rueda de turbina, cercano al eje, vamos a utilizar diseños de álabes de impulso y a medida que nos vamos alejando (recuerden que el álabe es una pequeña ala, tiene una longitud, una envergadura) hacia la puntera. Esta puntera va ser diseñada con perfiles de de álabe de reacción. En el mismo álabe se va a tener un doble formato: en la raíz una forma de perfil de álabe de impulso y en la puntera una forma de perfil de álabe de reacción.

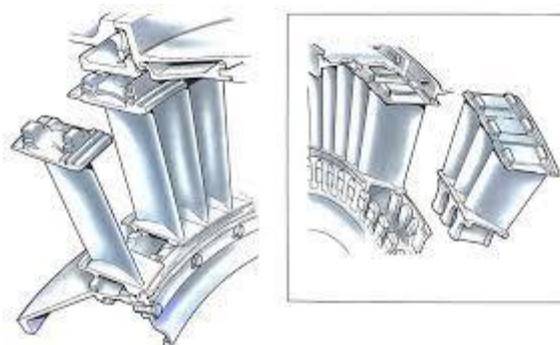
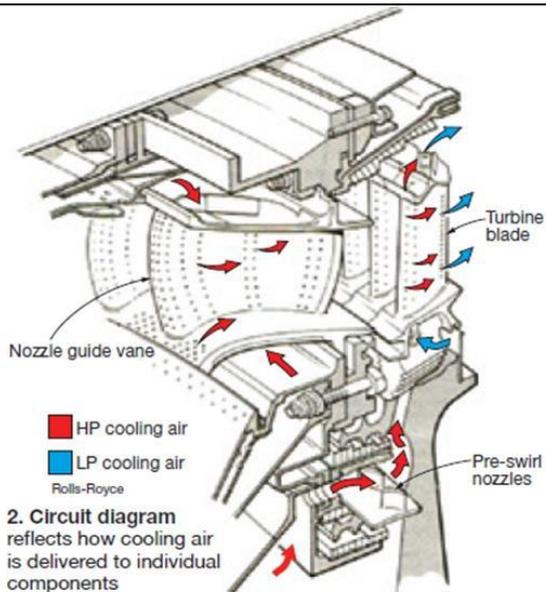
Eso es debido a que, para resistir los momentos flectores y los esfuerzos centrífugos que se dan en la turbina, la raíz del álabe debe tener las suficientes dimensiones para poder resistir estos esfuerzos. Esas dimensiones se las da la forma que tiene el perfil de una turbina de impulso. A medida que nos vamos alejando, los esfuerzos son menores, y cuando vamos llegando a la puntera podemos tener perfiles de menor espesor que van a tener la resistencia mecánica suficiente para los esfuerzos que se dan en ese sector del álabe.



Podemos observar cómo están montados los álabes en el disco rotor y se puede apreciar las diferencias en espesor de la raíz a la puntera. Los espesores son mucho más gruesos y con otro tipo de curvatura en la raíz. El encastre es similar a un árbol de pino. Se encastran y después se aseguran con diferentes tipos de seguros.

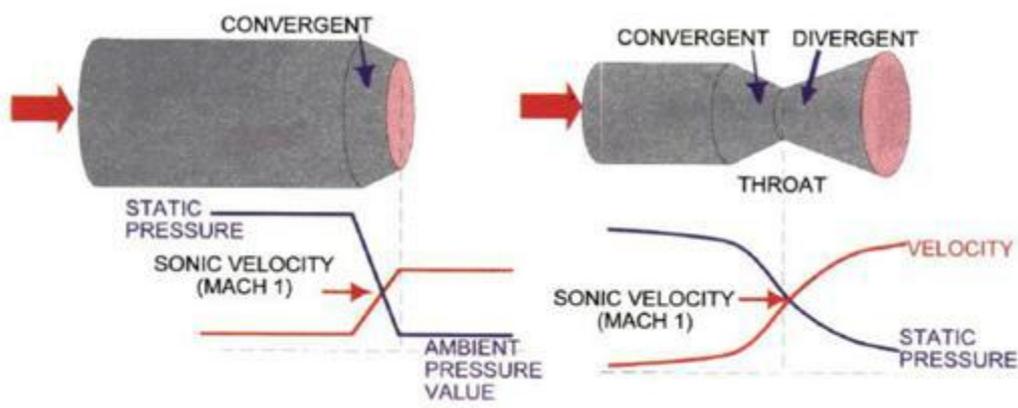


Tanto los álabes rotores como los estatores tienen refrigeración por aire para disminuir la temperatura de trabajo.



**Difusor de escape.**

El difusor de escape puede tener dos formas: convergente o una salida convergente-divergente.



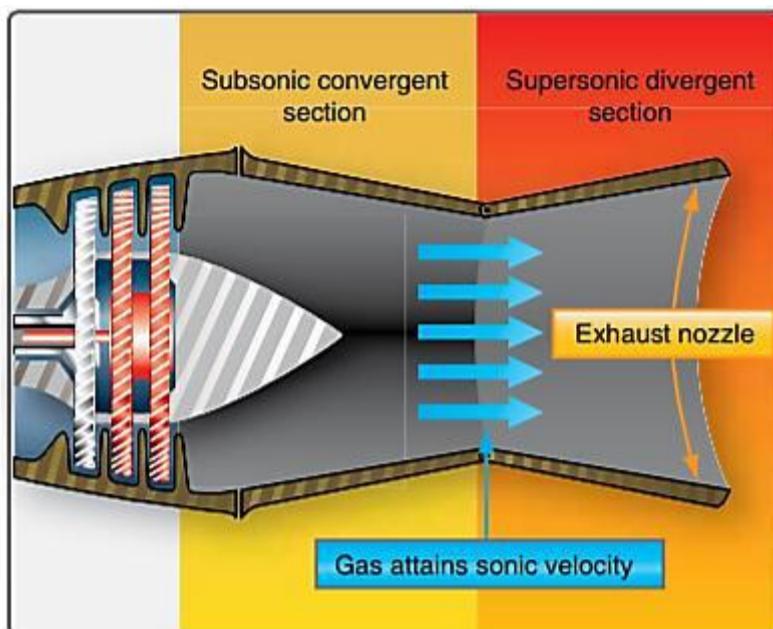
La idea en la salida convergente es que, obviamente al disminuir el área, la velocidad se va a incrementar. Entonces lo que se busca es tener una mayor velocidad de salida de los gases de escape para lograr un mayor empuje.

En caso que el régimen del motor haga que la velocidad de salida de los gases sea mach igual a uno (la velocidad del sonido) se debe colocar una tobera convergente-divergente que va a producir una expansión a velocidades supersónicas, en lugar de una onda de choque en la

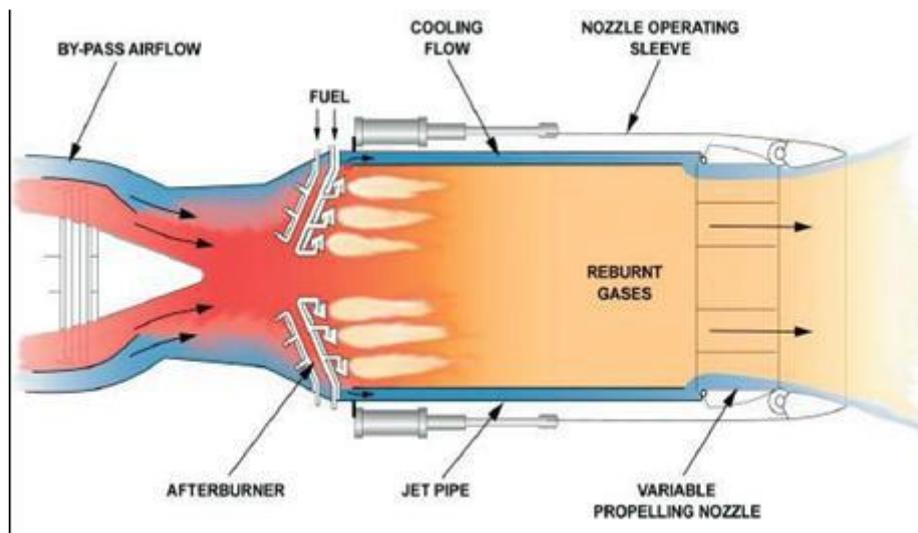
Ing. Aer. Claudio Movilla  
 Ing. Aer. Gustavo Solier

Ing. Aer. Roberto García  
 Ing. Aer. Rodrigo Zaguir

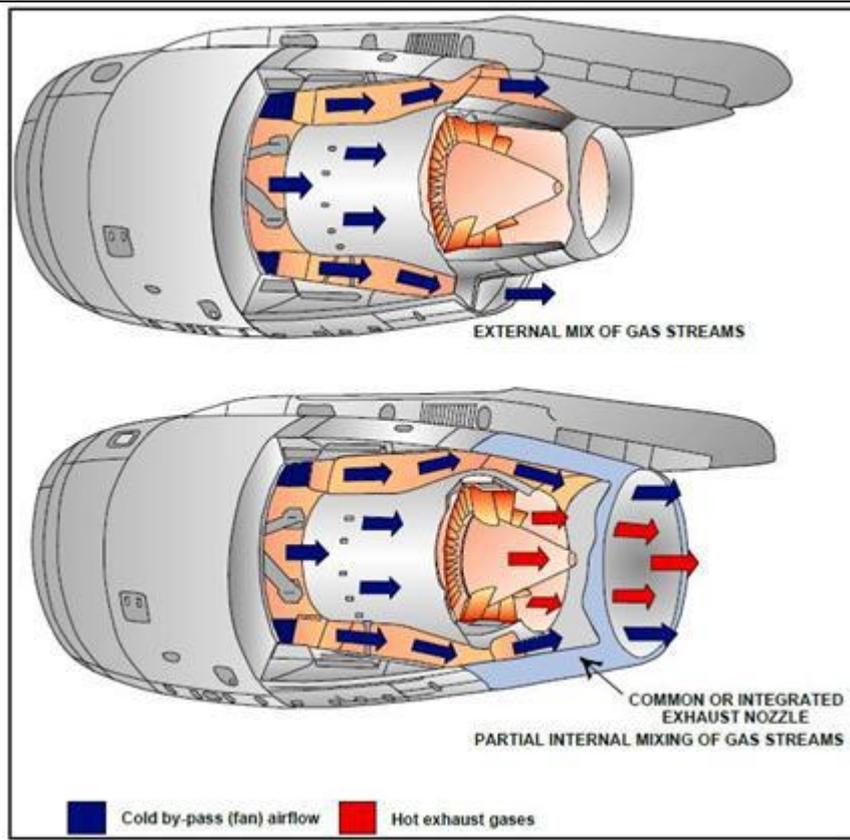
sección de garganta (mínima sección) tendremos una onda de expansión. Esta expansión obviamente va a producir un incremento de velocidad del fluido, y al incrementar la velocidad vamos a tener un mayor empuje.



En la figura siguiente se muestra un postquemador:



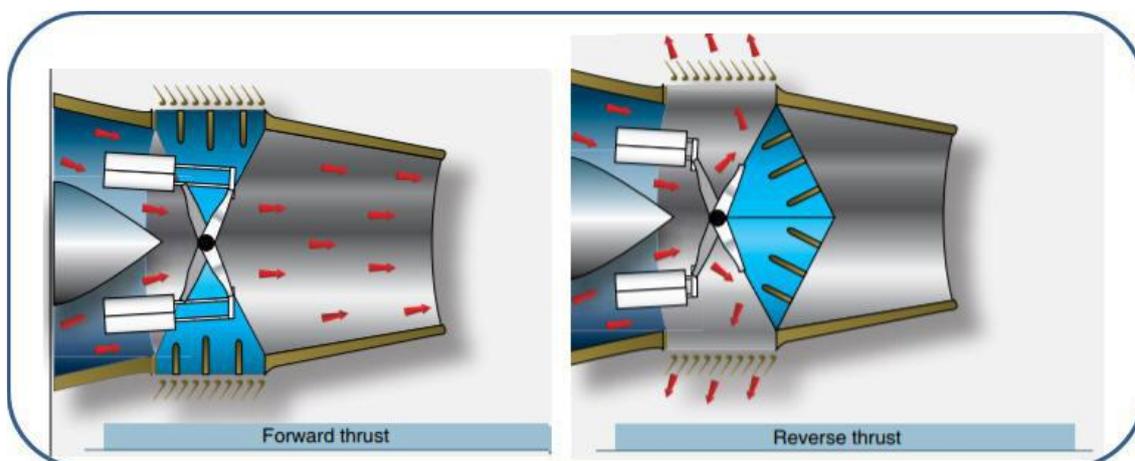
Es sencillamente un anillo de inyectores colocado alrededor del difusor de escape. El aire ya sale a una alta temperatura de la turbina y se encuentra con micro gotas de combustible donde, debido a su alta temperatura, se va a producir la combustión y al combustionar va a elevar la temperatura de los gases de escape que estaban saliendo del motor. El incremento de temperatura va a producir un incremento de velocidad, producto de la expansión de ese aumento de temperatura. El aumento de temperatura produce expansión, la expansión produce un incremento de velocidad de los gases, entonces al tener un incremento de velocidad vamos a tener un incremento de empuje en sentido contrario.



En la figura podemos ver dos diseños de un motor turbofan, donde en ambos tenemos que parte del aire no es procesado, no pasa por dentro del motor. En el primer diseño, la salida de ambos, tanto del procesado como del no procesado, es exterior al motor. Ya estamos en zona de presión atmosférica, mientras que en el otro diseño todavía está dentro del carenado del motor y se combinan los dos flujos de aire.

### Reversores

Su finalidad es la de buscar invertir el vector empuje a los efectos de generar una fuerza hacia atrás que lo que busca es detener, en tierra, el movimiento de la aeronave.



Esto se logra desviando el fluido de escape, en este caso, el fluido que está en el difusor de escape donde tenemos dos placas, que en la primera imagen están tapando las ventanas

Estas se pueden apreciar en la siguiente imagen:



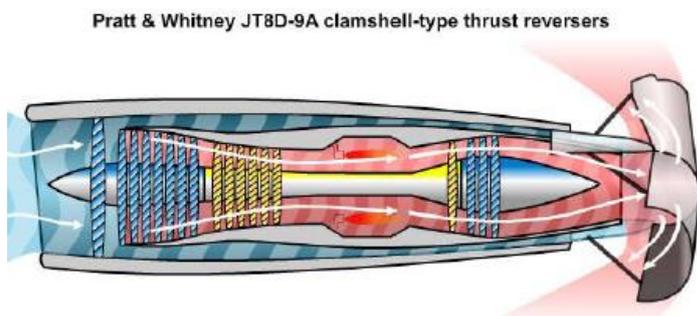
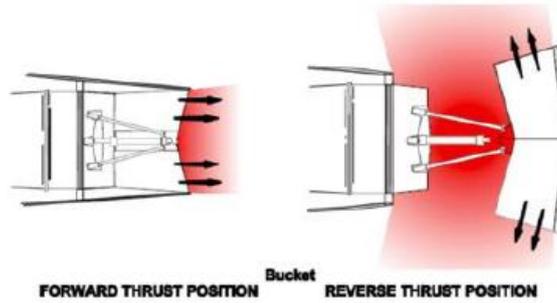
Este avión de cuatro motores y tiene reversor en los dos motores externos únicamente.

Los reversores tienen actuadores que pueden ser neumáticos o hidráulicos, en su mayoría son neumáticos, utilizan la señal de aire de sangrado del mismo motor (presión del compresor) para accionar el funcionamiento de las placas. Se puede observar que cuando tiran estos actuadores, las placas se colocan en posición obturando la salida y desviando el flujo de aire. El hecho de desviar el flujo de aire produce una inversión en el empuje (en el vector de empuje) haciendo que tengamos una fuerza en sentido contrario, para frenar el avión.

En todos los diseños de reversores que veremos, el sistema funciona solo en tierra. Cuando la aeronave toca tierra el piloto acciona en las palancas de acelerador de los motores unas palancas superpuestas para los reversores. Para poder accionar las palancas de los reversores los motores deben estar en ralentí de esta manera las placas se ponen en posición de armado y el motor se acelera nuevamente para generar un incremento de velocidad de salida de los gases de escape, donde estos rebotan y se desvían.

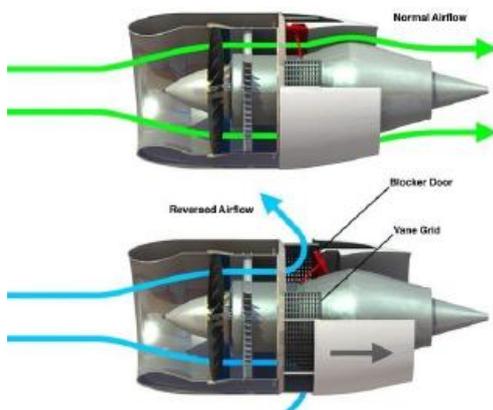
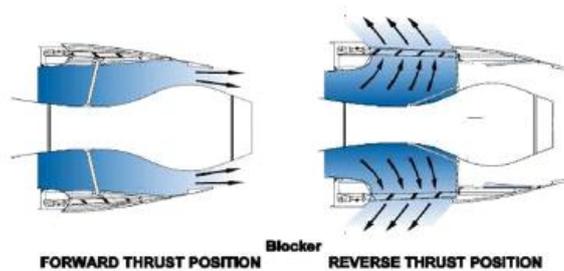
El sistema funciona incrementando las rpm del motor, cuando yo acciono el reversor, simultáneamente se incrementan las rpm del motor a los efectos de que salga un flujo de aire con velocidad, y que ese flujo rebote contra el reversor desviando su dirección y al hacer esto, generar un vector de empuje que va a tender a frenar la aeronave. El vector empuje del motor con el reversor armado tiene sentido contrario a la dirección y sentido de vuelo del avión.

Acá tenemos otro sistema semejante al anterior:



En este caso directamente se abren dos placas desviando el flujo de gases de escape produciendo la inversión del flujo. En este caso, no solo es aire caliente, sino que también estamos desviando el flujo de aire frío. Luego de armar el reversor, el motor nuevamente se vuelve a acelerar.

Tenemos un tercer diseño:

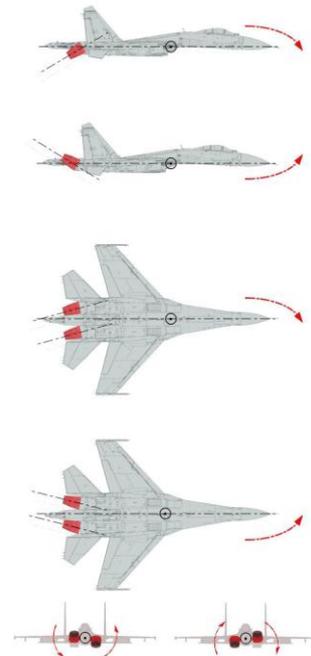


En este caso lo que se hace es desviar el flujo de aire frío del fan. Cuando se acciona el reversor, se incrementa la velocidad del aire a través del incremento de las rpm del motor y lo que busco es que se desvíen, la placa mueve su posición y desvía el aire produciendo un vector fuerza en el sentido contrario al avance del avión.

En este caso es un anillo en el carenado que se desplaza hacia atrás, y posiciona las placas en posición de armado haciendo que se desvíe el flujo. En este caso el flujo es de aire frío, en los casos anteriores veíamos que estaba en el difusor de salida y lo que desviaban era aire caliente. En el caso del motor bypass, además de desviar aire caliente se desvía también aire frío.

### Difusor-Empuje vectorial

En este caso, tenemos un difusor cuyo diseño va a permitir direccionar el flujo de escape, y de esta manera, mejorar la maniobrabilidad de la aeronave. Se pueden apreciar las distintas posiciones que pueden tomar, en función del tipo de maniobra que le facilita a la aeronave.



En el siguiente caso se utilizan tres placas que van a generar el desvío del flujo de escape.



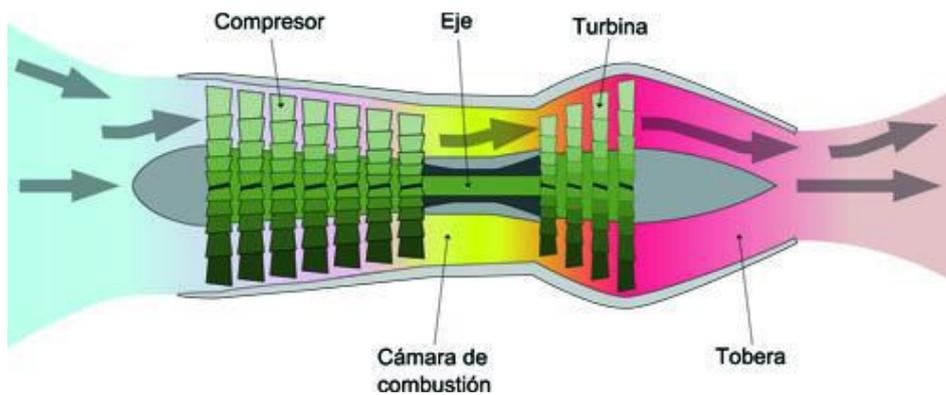
Ing. Aer. Claudio Movilla  
Ing. Aer. Gustavo Solier

Ing. Aer. Roberto García  
Ing. Aer. Rodrigo Zaguir

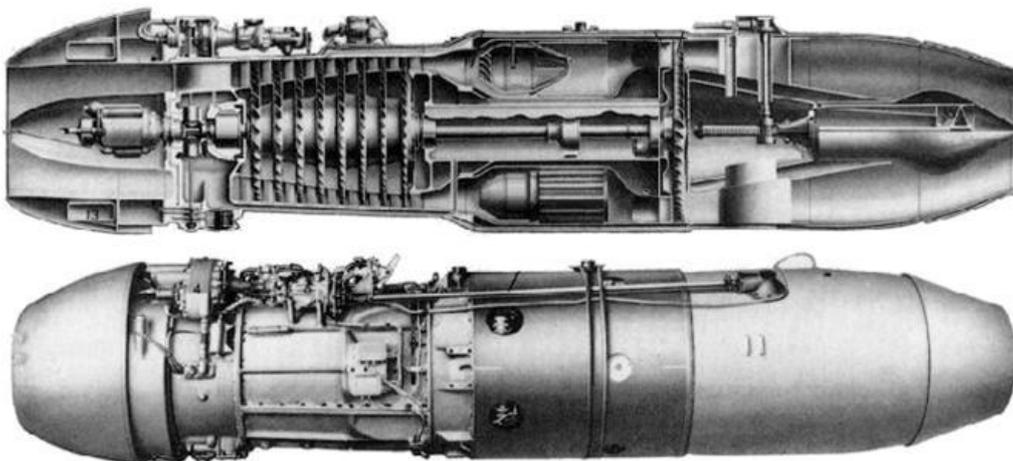
El siguiente diseño lo utiliza la aeronave Harrier para desviar el flujo de aire. Esto se denomina empuje vectorial.



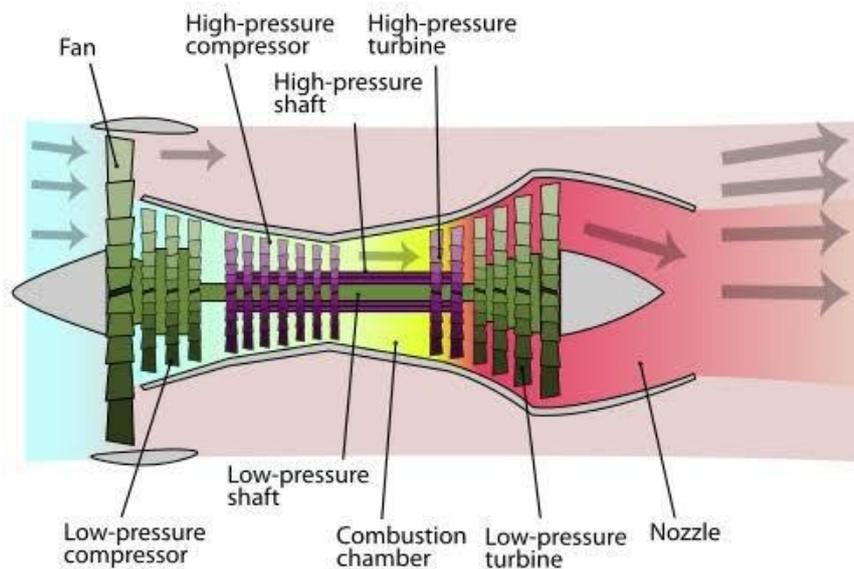
**Tipos de motores a reacción**



El turbo reactor puro está compuesto por un difusor de entrada, compresor, la cámara de combustión, la turbina, el difusor de escape y la salida.



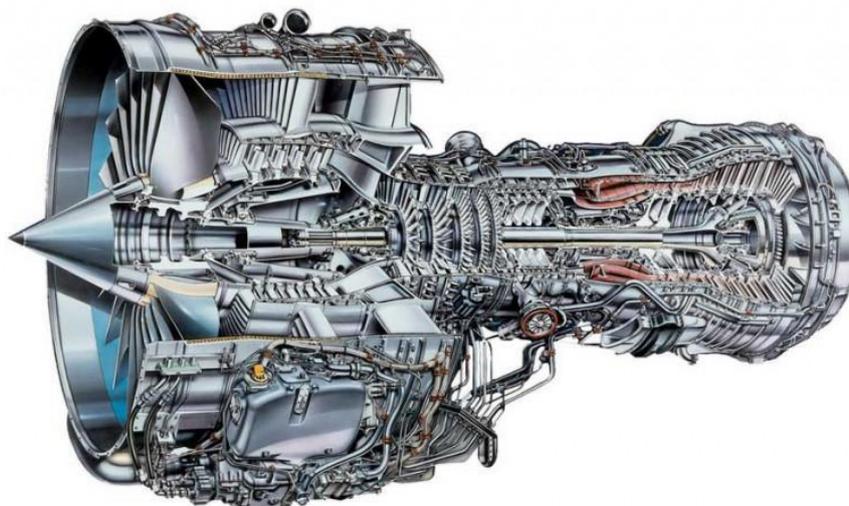
El motor alemán Hummo se utilizó en la Segunda Guerra Mundial. Muy sencillo: difusor de entrada, el compresor, el eje movido por esta turbina, cámara de combustión individual, tobera de escape convergente.



En un Turbofan tenemos el compresor movido por una turbina. A este conjunto de compresor, cámara de combustión y turbina se lo denomina generador de gases de alta presión.

Se provoca un incremento de velocidad del fluido para soplar al conjunto de turbinas. Este conjunto de turbinas a través del eje, que es interior con respecto al eje que mueve el generador de gases, pasa al eje que mueve el compresor de baja presión y al fan.

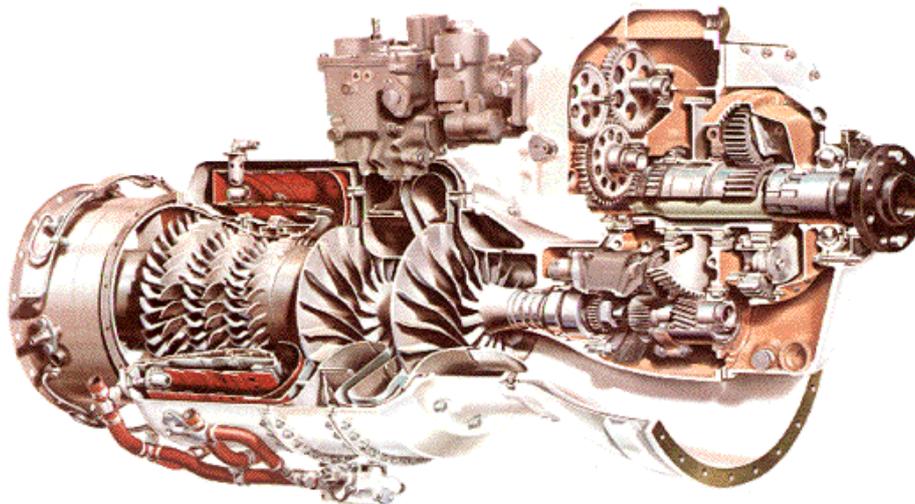
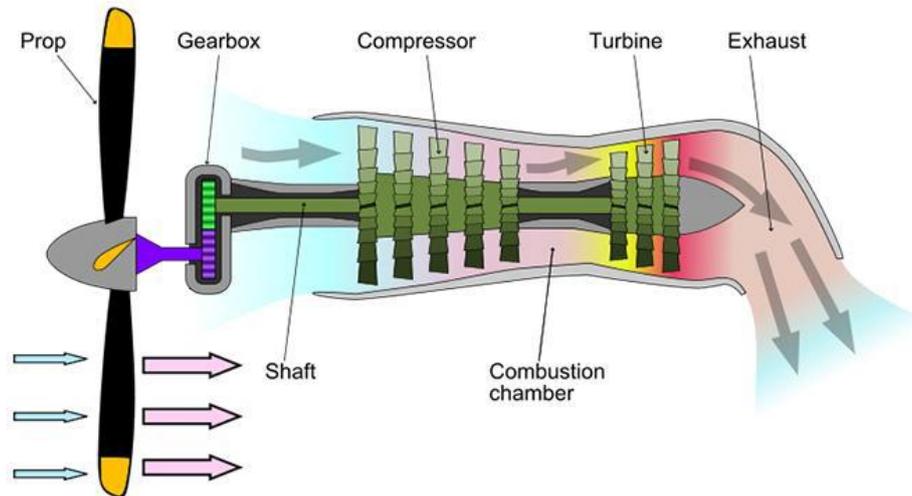
El aire ingresa por el difusor de entrada, parte de ese aire pasa por el compresor de baja presión e ingresa al compresor de alta presión, va a la cámara de combustión, luego a la turbina de alta presión, sopla a las turbinas de baja presión y de ahí sale hacia la tobera de escape. El fan va a mover una mayor cantidad de volumen de aire que no va a ser procesado dentro del generador de gases.



©2014 UNITED TECHNOLOGIES CORPORATION – PRATT & WHITNEY DIVISION

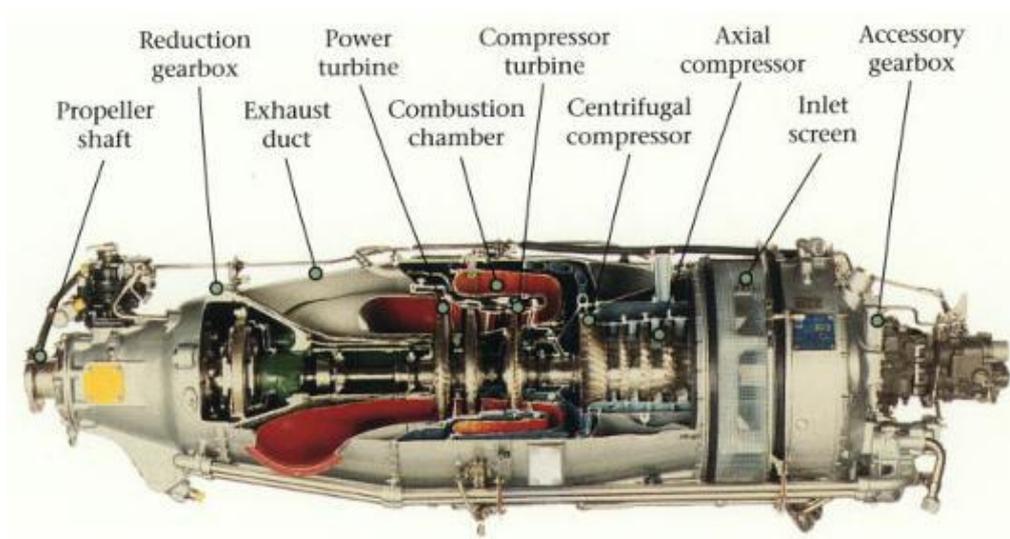
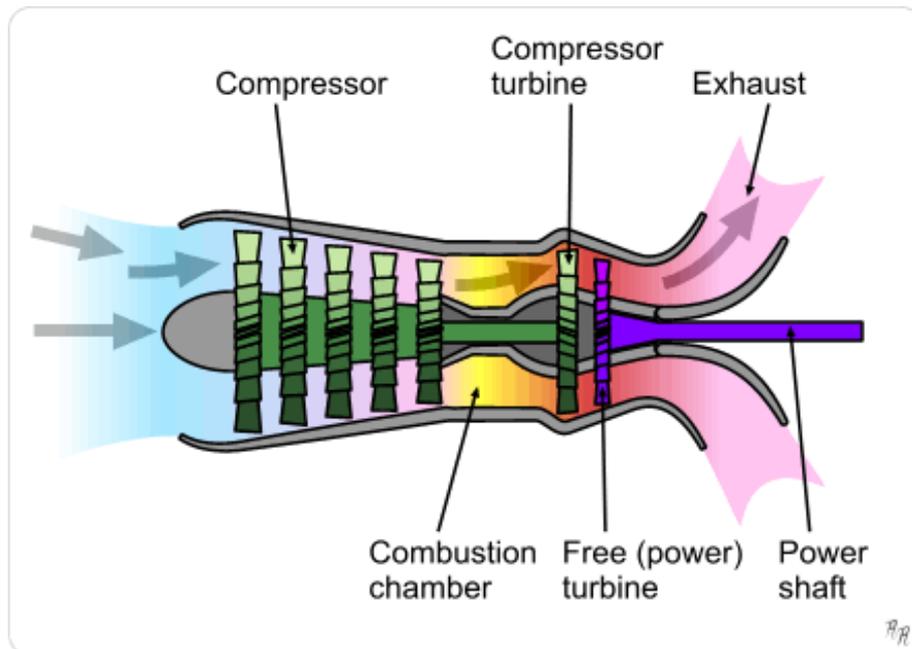
### Diseño de turbo hélice y turbo eje.

En el turbo hélice tenemos nuevamente compresor, cámara de combustión, turbina que mueve con su eje al compresor y sobre el mismo eje la caja reductora donde se va a montar la hélice.



En este caso al Ingresar el fluido, el aire atmosférico, pasa por la primera etapa de compresor centrífugo, luego por la segunda etapa de compresor centrífugo, cámara de combustión, turbina. La turbina monta sobre su eje a las dos etapas de compresor y mediante engranajes a la caja reductora donde se va a ubicar la hélice. El resto de los engranajes están relacionados con lo que se denomina caja de accesorios. Acá se pueden montar bombas hidráulicas, generadores, etc.

Motor turbo eje:

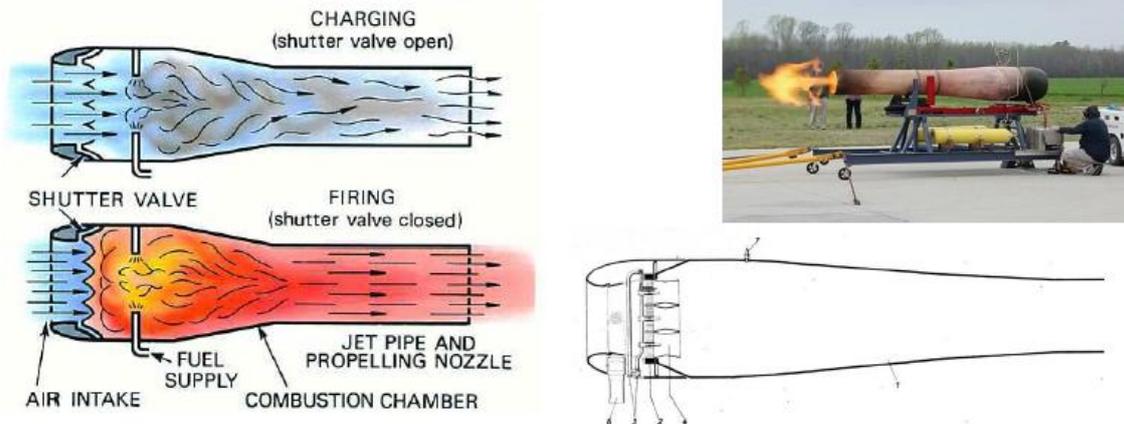


Nuevamente tenemos un generador de gases compuesto por el compresor, cámara de combustión y turbina. Los gases soplan una segunda turbina que va a mover un eje. Sobre este eje se pueden montar la caja reductora de la hélice, o también se puede montar a la caja principal de un helicóptero.

El ingreso del aire es por la sección trasera del motor, de ahí pasa por un compresor axial, luego por un compresor centrífugo, de ahí a una cámara de combustión invertida, luego a la primera turbina que mueve bajo un mismo eje al compresor (Este es el generador de gases). A partir de ahí tenemos dos turbinas separadas del generador de gases, con su propio eje y que mueven la caja reductora donde se va a montar la hélice.

### Pulso Reactor

Corresponde a otro diseño de motor que trabaja bajo el principio de variaciones de presión, generando la acción y la reacción, o sea generando empuje.



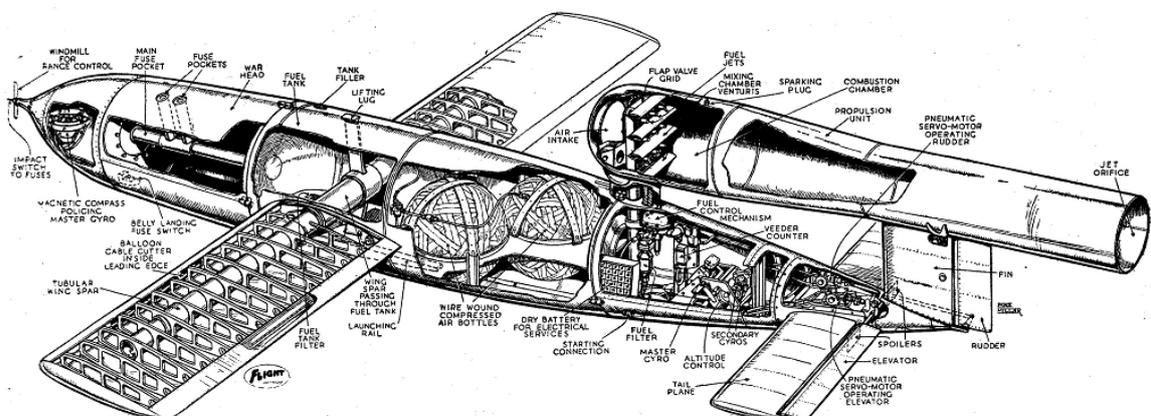
Posee una cámara donde hay inyectores de combustible, esta cámara tiene en un sector con válvulas, el sector del ingreso el aire y la tobera de escape. El aire ingresa a la cámara a través de las válvulas y se mezcla con el combustible. Se combustible se enciende a través de una bujía explota, se expande, se genera un incremento de presión que cierra las válvulas y la única vía de escape que tiene el fluido es a través de la tobera. Una vez que sale el fluido, se produce vacío, baja la presión y provoca la apertura de las válvulas.

Cuando se abren las válvulas vuelve a ingresar el aire, el aire se vuelve a mezclar con el combustible, debido a que ya está caliente la cámara explota, al explotar produce nuevamente la expansión, el incremento de presión, el cierre de las válvulas y el escape hacia atrás del fluido.

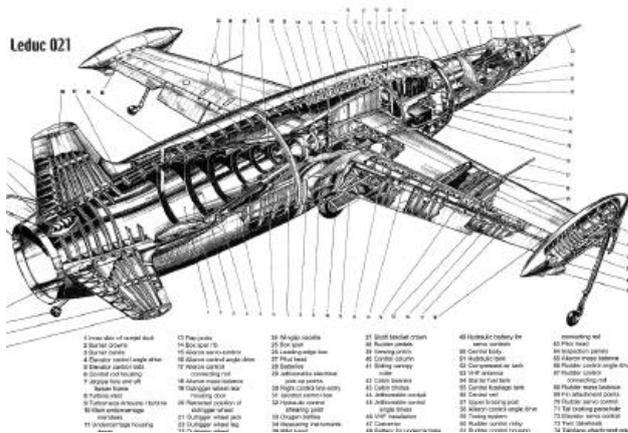
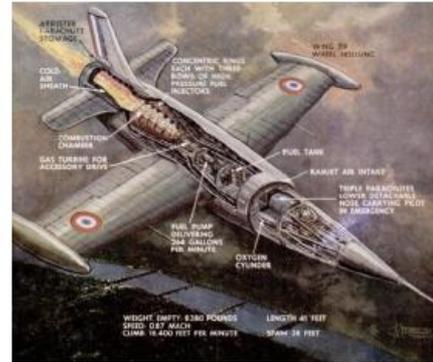
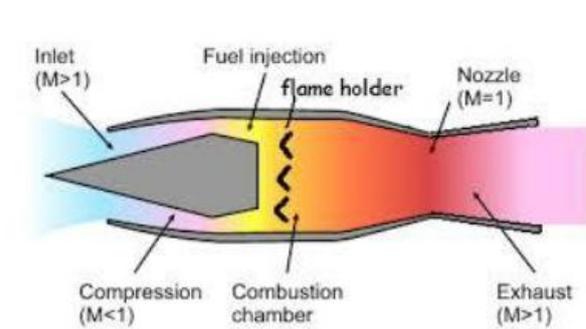
Como esto es un ciclo pulsante, no es un ciclo continuo, se lo denominó pulso-reactor.

Como desventaja tenemos, la vida límite de las válvulas. Por lo general son válvulas tipo flap. Consisten en una chapita que con ese tipo de vibración se genera fatiga y se termina rompiendo.

Es por eso que se utilizó como motor de una bomba de la Segunda Guerra Mundial. Dada su corta vida útil es que se utilizaba en este tipo de artefacto aéreo.



El último de los diseños es el del estado reactor.



En primer lugar, el aire se dirige hacia la entrada del reactor, que está en movimiento a gran velocidad, donde resulta parcialmente comprimido y aumenta su temperatura por el efecto de presión dinámica. Si la velocidad a la que entra el aire en el motor es lo bastante alta, esta compresión puede ser suficiente y el reactor podría funcionar sin compresor ni turbina.

El siguiente paso es el de la combustión del aire, cuyo proceso se realiza en la cámara de combustión, donde hay una serie de inyectores que pulverizan el combustible de manera continua. Cuando el combustible y el aire se mezclan en la cámara de combustión una serie de bujías encienden la mezcla y comienza la combustión, alcanzándose altas temperaturas (unos 700 °C), por lo que es necesario aislar la cámara de combustión con un recubrimiento cerámico especial.

Finalmente, los gases resultantes de la combustión salen a gran velocidad por la tobera de escape, la cual tiene forma convergente-divergente, con flujo subsónico de los gases en el tramo convergente (número de Mach menor a 1), flujo sónico en la garganta (número de Mach igual a 1) y flujo supersónico al expandirse en la zona divergente (número de Mach >1).

Estos motores eran montados en aeronaves que tenían que ser auxiliadas para llegar a esa velocidad cercana a la del sonido para poder empezar a producir valores de onda de choque en el interior.

Es de ahí que, podemos ver una aeronave montada en un avión nodriza. En otros casos, se utilizan motores cohete para que la aeronave llegue a la velocidad donde va a comenzar a ser operativo el motor.