

FUNDAMENTOS

Energía Potencial y Energía Cinética

Energía es la capacidad para hacer trabajo. Trabajo, en el sentido mecánico de la palabra, es la realización de una operación productiva por algunos medios mecánicos, y el trabajo se efectúa cuando se aplica una fuerza a través de una distancia. Cuando un trozo de materia se encuentra estacionario, a menudo tiene energía debida a su posición en relación con otros trozos de materia. Esto se llama energía potencial porque el trozo de materia tiene capacidad potencial para hacer trabajo. Si el trozo de materia se mueve, tiene energía cinética, o energía debida al movimiento.

Las formas de energía son numerosas, tal como la energía química (la energía producida por una reacción química), la energía calorífica (la energía producida por desprendimiento de calor), la energía eléctrica (la energía disponible de la electricidad), la energía de presión (la energía de un gas bajo presión), y la energía mecánica (la energía ejercida por una máquina o un hombre). Todos los tipos de energía son capaces de hacer trabajo. En la práctica, la energía puede transformarse de una forma a otra, pero no todas las energías pueden recuperarse cuando la transformación está hecha. Por ejemplo, cuando se usa la electricidad para girar un motor eléctrico, una parte de la energía eléctrica se cambiará en calor a causa de la fricción. Puesto que la energía calorífica así generada se perderá en el aire, solamente la energía mecánica del eje del motor estará disponible para efectuar trabajo.

Es por la transformación del tipo de energía por lo que es posible la propulsión a chorro. Esencialmente esto se hace transformando la energía química del combustible en energía calorífica, y luego en energía mecánica para acelerar el aire a través del motor. Es esta aceleración la que principalmente es responsable de que el avión se mueva.

Como se ha dicho, existen muchas formas de energía: química, mecánica, eléctrica, calorífica, lumínica, y nuclear. Pero solamente hay dos clasificaciones básicas en las cuales se ajustan todos los tipos de energías: la potencial y la cinética. A medida que el aire pasa a través del motor de turbina de gas y se le añade o extrae energía, hay un cambio continuo entre sus energías potencial y cinética. La energía total del aire que pasa a través del motor es siempre la suma de sus energías cinéticas y potencial.

Leyes de Newton del Movimiento

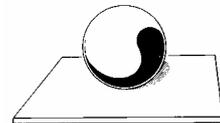
Muchas de las cosas que ocurren en un motor de turbina de gas pueden explicarse por medio de una o más de las leyes del movimiento de Newton.

PRIMERA LEY DE NEWTON

Un cuerpo en reposo permanecerá en este estado a menos que sea modificado por una fuerza exterior.

Ejemplo: Una bola colocada en una mesa nivelada, permanecerá estática hasta que se le haga mover por una fuerza tal como una ráfaga de viento o un empujón por la mano de una persona.

Una segunda parte de la primera ley de Newton dice que un cuerpo en movimiento continuará moviéndose en línea recta a una velocidad uniforme hasta que sea alterada por una fuerza exterior. Al funcionamiento del motor de reacción no le concierne esta parte de la ley.

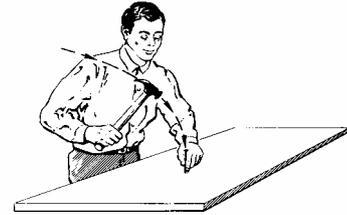


SEGUNDA LEY DE NEWTON

Un cambio en el movimiento es proporcional a la fuerza aplicada. Esto se puede decir de otra forma: Una fuerza proporcional a la relación de cambio de la velocidad se produce cuando quiera que un cuerpo o masa se acelera. Matemáticamente, la segunda ley de Newton puede explicarse por una ecuación de esta manera:

$$F = M \times a$$

Ejemplo: Cuando una persona golpea un clavo con un martillo, la fuerza con la que el martillo golpea al clavo es proporcional a la masa (la cual es proporcional al peso) del martillo, multiplicada por la cantidad con que la persona acelera la cabeza del martillo, desde cero a la velocidad final. Sería difícil, por ejemplo, clavar una gran escarpia con un martillo para tachuelas, ya que la cabeza del martillo tiene muy poca masa. Similarmente, incluso con un gran martillo, sería una tarea larga y fastidiosa clavar una escarpia solamente con ligeros golpes porque la aceleración aplicada a la cabeza del martillo es demasiado pequeña.

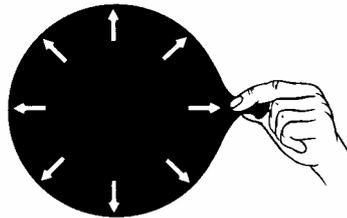
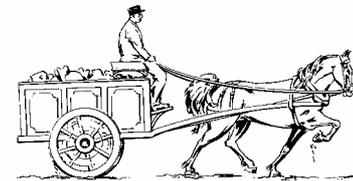


TERCERA LEY DE NEWTON

Para cada acción, hay siempre una reacción igual y contraria.

Ejemplo: Cuando un caballo mueve una carreta o un vagón, el empuje de sus cascos debe sentirse sobre la carreta lo suficientemente como para que esta se mueva.

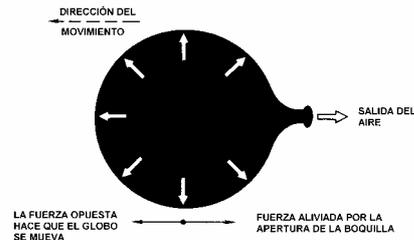
Un globo de un niño se puede utilizar para ilustrar como las leyes de Newton facultan a un turborreactor (o cualquier otro tipo de motores de reacción) para desarrollar empuje. Cuando el globo se infla con aire a la temperatura de la habitación, y la boquilla se mantiene cerrada de forma que ningún aire pueda escapar, el globo permanecerá sin movimiento sobre una mesa porque la presión del aire en el interior del globo actúa sobre la pared del mismo igual en todas las direcciones. Ninguna fuerza se ejerce que haga al globo moverse.



CON LA BOQUILLA SUJETA EL GLOBO NO SE MUEVE

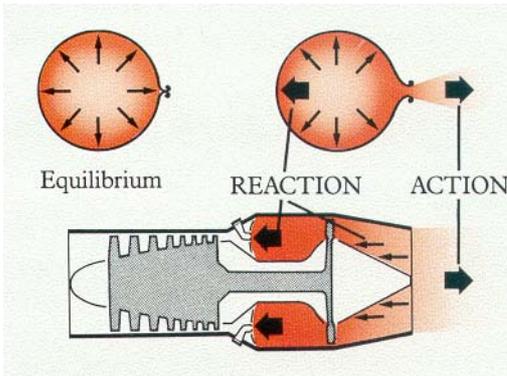
Cuando la boquilla del globo se suelta, el aire escapa a través de la misma abierta porque ya no hay una superficie para mantener el aire en el interior del globo. Además, este cambio de una pequeña sección de la superficie del globo produce fuerzas desequilibradas sobre el mismo sacando la fuerza que presionaba sobre el área que estaba cerrada por la boquilla. La fuerza aplicada al resto de la superficie del globo permanece como estaba antes. Consecuentemente, el

desequilibrio de presión resultante hace que el globo se mueva en la dirección opuesta a la boquilla.



Es el desequilibrio de las fuerzas en el interior del globo (o motor de turbina de gas, cohete, pulsorreactor o estatorreactor) lo que le da a todos los motores de reacción su nombre. Esta es la razón también porqué los motores de reacción son

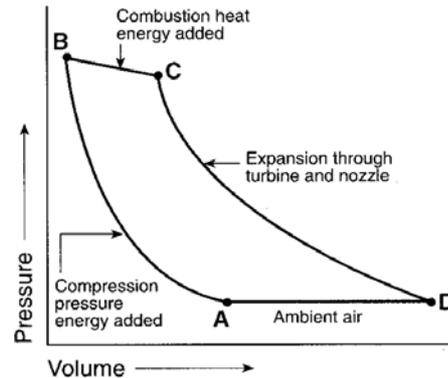
capaces de producir empuje sin apoyarse verdaderamente en el aire al exterior de sus toberas de salida. Ambas, la "acción" y la "reacción" fuerzas descritas por Isaac Newton tienen lugar dentro del motor, motor cohete, u otros mecanismos de propulsión a chorro. Debe observarse que el globo se habría desplazado por la habitación incluso si la habitación hubiera sido una gran cámara de vacío. Los cohetes, por ejemplo, (los cuales llevan su propio combustible y oxidizador donde quiera que vayan) pueden funcionar en las zonas sin aire del espacio exterior.



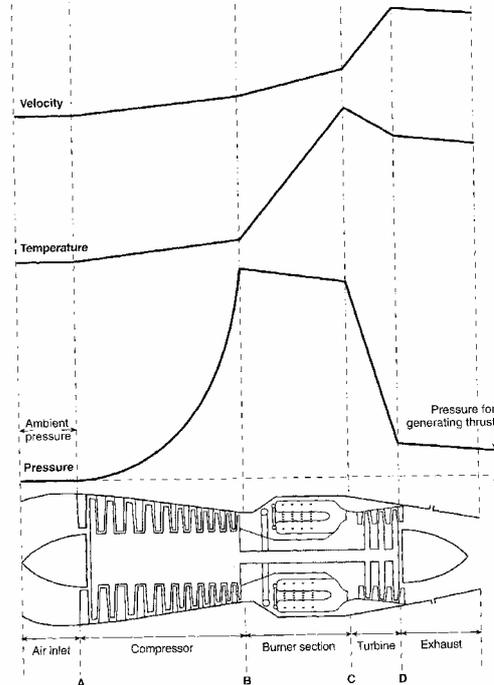
Ciclo de Brayton

Un motor de turbina de gas libera la energía del combustible en un ciclo termodinámico llamado el ciclo de Brayton. Los mismos pasos —admisión, compresión, expansión, potencia, y escape— que tienen lugar en el ciclo de volumen constante de Otto usado para los motores alternativos, ocurren en un motor de turbina de gas. La diferencia básica entre los dos ciclos es que en un motor de ciclo de Otto, los pasos ocurren en el mismo sitio, en el cilindro del motor, pero en diferentes tiempos. En el ciclo de Brayton, los pasos tienen lugar al mismo tiempo pero en distintos puntos dentro del motor.

1. El aire entra en el conducto de entrada y fluye hacia la entrada del compresor, punto A, a presión ambiente.
2. El aire pasa a través del compresor, que eleva su presión y disminuye su volumen al representado por el punto B.
3. Luego, el aire pasa dentro de la cámara de combustión donde el combustible se inyecta en él y se quema. La presión entre los puntos B y C permanece relativamente constante a medida que se añade energía calorífica, pero el volumen y la temperatura aumentan.



4. Los gases calientes dejan la cámara de combustión y pasan a través de la turbina donde se le extrae energía y la presión cae a casi el ambiente en el punto D.



Las presiones entre los puntos A y D son casi las mismas, pero en D el volumen y así la velocidad son mucho mayores. El aire se ha expandido a una presión relativamente constante.

Relación entre Fuerza, Trabajo, Potencia, Energía, Velocidad y Aceleración

Fuerza

La fuerza es un vector cantidad (una cantidad que tiene dirección y magnitud) que hace que un objeto se acelere en la dirección de su aplicación. En la práctica mecánica tal como el estudio de los motores de turbina de gas, la fuerza normalmente se expresa en libras o kilogramos.

Trabajo

Trabajo es la transferencia de energía hacia un cuerpo por la aplicación de una fuerza que mueve al cuerpo en la dirección de la fuerza. Se mide como el producto de la fuerza en libras o kilogramos por la distancia en pies, pulgadas, metros o centímetros a través de la cual el cuerpo se mueve, y se expresa en términos de libras - pies, libras - pulgadas, kilogramos - metros etc.

$$\text{Trabajo} = \text{Fuerza} \cdot \text{Espacio}$$

Potencia

La potencia es el régimen al cual el trabajo se realiza. Es el número de libras-pies de trabajo realizado en un determinado espacio de tiempo. La potencia se expresa en unidades tal como libras-pies por minuto, libras pies por segundo, o kilogramos – metros por minuto, kilogramos – metros por hora etc.

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}}$$

Energía

La energía se define como la capacidad para hacer trabajo. La energía que los cuerpos poseen puede clasificarse en dos categorías: *potencial* y *cinética*. La energía potencial puede deberse a la posición, tal como el agua almacenada en un depósito elevado; la deformación de un cuerpo elástico tal como un muelle comprimido; o una acción química, por ejemplo, del carbón.

Ejemplo: Un avión que pesa 20.000 lbs (9.072 Kg) es mantenido a 5 ft (1'52 m) del suelo por medio de gatos. ¿Cuánta energía potencial posee este sistema?

$$PE = WH$$

$$= 20.000 \times 5$$

$$= 100.000 \text{ ft lb (13.830 kg m)}$$

donde PE = energía potencial, ft lb

W = peso del objeto, lb

H = altura del objeto, ft

La energía cinética es la energía del movimiento. Los gases impactando contra la rueda de turbina representan la energía cinética. Si la masa y la velocidad de un cuerpo se conocen, la energía cinética puede determinarse por la formula

$$KE = \frac{WV^2}{2g}$$

donde W = peso, lb

V = velocidad, ft/s

g = aceleración debida a la gravedad = 32'2 ft/s² (9'81 m/s²)

KE = energía cinética, ft lb

Obsérvese que la energía cinética es directamente proporcional al peso y al cuadrado de la velocidad.

Ejemplo: Un avión que pesa 6.440 lbs [2.924 Kg.] vuela a una velocidad de 205 mph (300 ft/s) [330 km./h (91'6 m/s)]. Calcúlese su energía cinética.

$$KE = \frac{WV^2}{2g}$$

$$= \frac{6.440 \times 330^2}{2 \times 32'2}$$

$$= 9.000.000 \text{ ft lb (1.244.700 kg m) de energía}$$

Velocidad (speed)

Velocidad (speed) es una medida del régimen de movimiento y normalmente se considera como la distancia recorrida dividida por el tiempo empleado en recorrerla. La velocidad (speed) no tiene en cuenta la dirección del desplazamiento y se expresa en millas por hora, pies por segundo, kilómetros por hora o metros por segundo.

$$\text{Velocidad (speed)} = \frac{\text{espacio}}{\text{tiempo}}$$

Velocidad (velocity)

Velocidad (velocity) es un vector cantidad cuya magnitud es la velocidad (speed) del objeto y cuya dirección es la dirección en la cual el objeto se mueve. El símbolo V se usa para representar la velocidad.

Aceleración

La aceleración de un cuerpo en movimiento se define como el régimen de cambio de velocidad. La definición no está basada en la distancia recorrida, sino en la pérdida (desceleración) o ganancia (aceleración) de velocidad con el tiempo.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{variación de velocidad}}{\text{unidad de tiempo}}$$

$$= \frac{\text{velocidad final} - \text{velocidad inicial}}{\text{tiempo}}$$

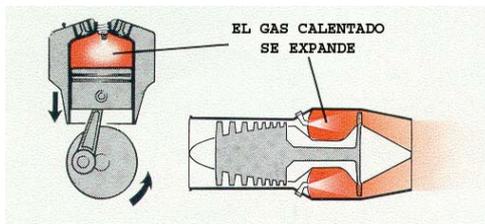
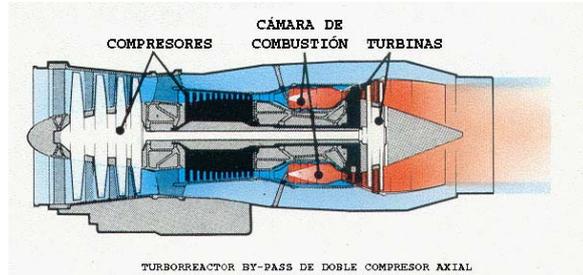
$$= \frac{V_2 - V_1}{t}$$

Adaptación Estructural y Funcionamiento de Turborreactores, Turbofanés, Turboejes, Turbohélices.

Un motor turborreactor es esencialmente una máquina diseñada para el único propósito de producir gases a alta velocidad en la tobera de salida. El motor se pone en marcha girando al

compresor con una unidad de puesta en marcha, y luego encendiendo la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión con uno o más encendedores los cuales en cierto modo parecen bujías de automóvil. Cuando el motor se ha puesto en marcha, y su compresor está girando a suficiente velocidad, la unidad de puesta en marcha y los encendedores se desconectan. El motor entonces funcionará sin ninguna posterior ayuda durante tanto tiempo como el combustible y el aire en las proporciones adecuadas continúen entrando en la cámara de combustión.

El secreto de porqué un turborreactor funciona como lo hace, reside en el compresor. Los gases originados por una mezcla de combustible y aire ardiendo bajo presión atmosférica normal no se expansionan lo suficiente como para hacer un trabajo útil. El aire bajo presión debe mezclarse con el combustible antes de que los gases producidos por la combustión puedan emplearse con éxito para hacer a un motor turborreactor o de émbolo funcionar. Cuanto más aire pueda comprimir un motor y utilizar, mayor es la potencia o empuje que puede desarrollar.



Encontrar una forma satisfactoria para realizar la difícil tarea de comprimir el aire, fue el mayor obstáculo para los constructores durante los primeros años de desarrollo del motor de reacción. En Inglaterra, Frank Whittle solucionó el problema utilizando un compresor centrífugo similar a esos que se emplean ahora en los alimentadores para aviones con motor de émbolo. Whittle proporcionó la

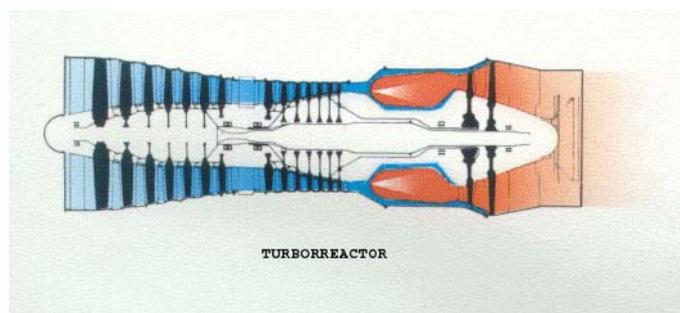
potencia necesaria para girar al compresor montando una turbina de gas inmediatamente detrás de las cámaras de combustión del motor, aproximadamente de la misma manera que se hace hoy.

La potencia necesaria para arrastrar al compresor en un motor turborreactor es increíblemente alta. Rentables motores de turbina de gas se habrían desarrollado antes si alguien hubiera sabido como construir una turbina para producir suficiente potencia como para girar al compresor y todavía dejase suficiente energía en los gases de escape para generar una cantidad aprovechable de empuje hacia delante. Las primeras combinaciones de compresor y turbinas ocasionalmente conducían a motores de éxito. Para indicar cuanta potencia se absorbe en el compresor de un turborreactor moderadamente grande, supongamos que tenemos un motor con aproximadamente 12:1 de relación de compresión que produce 10.000 libras de empuje en despegue. En este motor, la turbina tiene que producir aproximadamente 35.000 HP al eje precisamente para arrastrar al compresor cuando el motor está funcionando a pleno empuje, y la turbina que hace esto, requiere menos espacio dentro del motor que el que normalmente se asigna a los motores de émbolo completos de relativamente baja potencia en la ordinaria familia del automóvil; a grosso modo tres cuartos de la potencia generada dentro de un motor de reacción se utilizan para arrastrar al compresor, solamente lo que sobra se utiliza para producir el empuje necesario para propulsar al avión.

El Turborreactor

Si un avión con motor de turbina de gas utiliza solamente el empuje desarrollado dentro del motor para producir su fuerza propulsora, este motor es un turborreactor.

Un turborreactor obtiene su empuje dando una gran aceleración a una pequeña masa de aire, la cual pasa toda a través del motor. Puesto que



se requiere una alta velocidad del chorro de gases para obtener una cantidad de empuje aceptable, la turbina de un turbo reactor está diseñada para extraer de la corriente de gas caliente solo la suficiente potencia para arrastrar al compresor y los accesorios. Toda la fuerza propulsiva producida por un motor de reacción se obtiene del desequilibrio de fuerzas dentro del propio motor

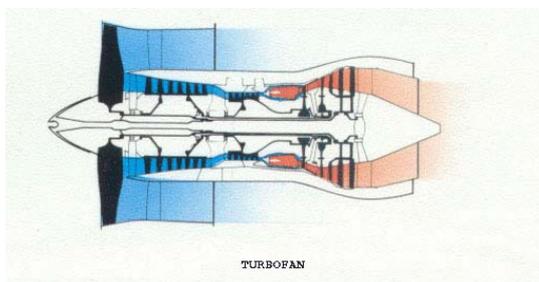
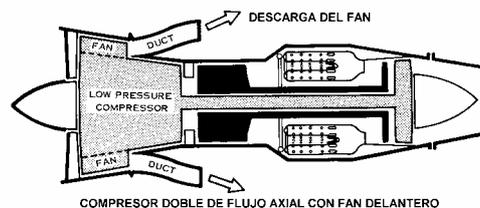
Las características y usos del turbo reactor son como sigue:

1. Empuje bajo a velocidades lentas
2. Consumo específico de combustible (TSFC) relativamente alto a bajas altitudes y velocidades, una desventaja que disminuye a medida que la velocidad y la altitud aumentan
3. Largas carreras de despegue
4. Área frontal reducida, resultando en una baja resistencia aerodinámica y problemas de distancia al suelo reducidos
5. Baja relación peso empuje (peso por libra de empuje producida)
6. Capacidad para obtener ventaja de las altas relaciones de presión de impacto

Estas características indican que el motor turbo reactor es mejor para alta velocidad, gran altitud, y vuelos de largo alcance.

El Turbofan

El motor turbofan tiene un fan encerrado en un conducto montado en la parte frontal o posterior del motor arrastrado bien con velocidad reducida por medio de engranajes o a la misma velocidad que el compresor, o por medio de una turbina independiente localizada en la parte posterior de la turbina de arrastre del compresor. El aire de fan puede salir independientemente de la descarga de gases del primario (conducto corto), o puede ser conducido hasta atrás para mezclarse en la parte posterior con la corriente primaria del motor (conducto largo). En algunos motores de conducto largo el flujo de aire primario y el secundario pueden mezclarse internamente y luego salir por una tobera común, o las dos corrientes de gas pueden mantenerse separadas a todo lo largo del motor. Si el aire de fan es conducido hasta la parte posterior, la presión total del fan debe ser mayor que la presión estática del gas en la descarga primaria del motor, o de lo contrario el aire no fluirá. Del mismo modo, la presión estática de descarga del fan debe ser menor que la presión total en la descarga primaria del motor, o la turbina no será capaz de extraer la energía requerida para arrastrar al compresor y al fan. Cerrando el área de flujo del conducto de fan, puede reducirse la presión estática y aumentarse la presión dinámica.

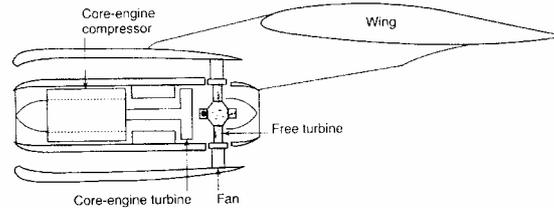


El rendimiento del motor de fan se aumenta por encima del reactor puro por medio de la conversión de la energía del combustible en energía de presión mas que por la energía cinética (dinámica) de un chorro de gases de escape a alta velocidad. Como se verá en la formula del empuje, la presión multiplicada por el área es igual a una fuerza. El fan produce esta fuerza adicional o empuje sin aumentar el flujo de combustible. las velocidades y

presiones de descarga del gas primario del motor son bajas debido a las etapas de turbina extras necesarias para arrastrar el fan, y como resultado el motor turbofan es mucho más silencioso. Por diseño la velocidad del aire relativa a los álabes de fan no está afectada por la velocidad del avión. Este diseño elimina la pérdida en rendimiento operacional a altas velocidades

La primera generación de diseños del turbofan, tal como la serie de motor Pratt & Whitney JT3D, tenía una relación de paso de aproximadamente 1:1; es decir, alrededor del 50 por

ciento del aire iba a través del núcleo motor como flujo de aire primario, y aproximadamente el 50 por ciento iba a través del fan como flujo de aire secundario. La segunda generación de turbofanes como el General Electric CF6, el Pratt & Whitney JT9D, y el Rolls-Royce RB211 tienen relaciones de paso del orden de 5:1 o 6:1. De esta forma el fan proporciona un mayor porcentaje del empuje total producido por el motor.



MOTOR TURBOFAN DE FAN POSTERIOR SIENDO LOS ALABES DE FAN UNA PROLONGACION DE LOS ALABES DE LA TURBINA LIBRE

En términos de flujo de aire real, la Tabla 1 muestra el flujo de aire del fan o corriente fría, y el flujo de aire del núcleo motor o corriente caliente para un motor con un flujo de aire total de 1000 lb/s a diferentes relaciones de paso. Otros motores con distintos flujos de aire tendrán distintos flujos de aire de fan y de núcleo motor para relaciones de paso similares. Por ejemplo, para un motor con un flujo de aire de 500 lb/s, divídase cada flujo de aire de fan y núcleo motor por dos para una determinada relación de paso.

El interés por el uso y desarrollo del motor turbofan en los años recientes se debe principalmente al desarrollo del álabe transónico. El fan de gran diámetro requeriría unas r.p.m. más bajas para mantener la punta de los álabes por debajo de la velocidad del sonido, un desarrollo que no conduciría al buen diseño de la turbina de gas.

Los motores de fan muestran una superioridad definida sobre los reactores puros a velocidades por debajo del Mach 1, la velocidad de los aviones comerciales actuales. El área frontal aumentada del fan presenta un problema para los aviones de alta velocidad, los cuales, por supuesto, requieren áreas frontales pequeñas. A altas velocidades, el fan aumenta la resistencia aerodinámica más de lo que compensa el mayor empuje neto producido. La desventaja del fan para los aviones de alta velocidad puede compensarse por lo menos parcialmente quemando combustible en el aire de descarga del fan. Este proceso expande el gas, y, con idea de mantener el aire de descarga de fan a la misma presión, se aumenta el área de la tobera de descarga del fan. Esta acción da como resultado un empuje bruto aumentado debido a un aumento en presión multiplicado por un área, y un consumo de combustible aumentado. Los motores turbofan de muy bajas relaciones de paso (menos de uno) se están usando en algunos aviones de combate capaces de velocidades supersónicas.

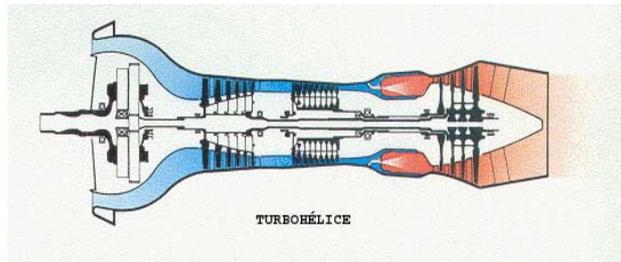
El turbofan combina el buen rendimiento operacional y la gran capacidad de empuje de un turbohélice con la gran velocidad y gran capacidad de altura de un turboreactor. La complejidad y peso de los engranajes de reducción de la hélice y el intrincado sistema de mando de la hélice de un turbohélice están completamente eliminados en un turbofan. Un turbofan, sin embargo, no solo es más ligero que un turbohélice sino que además nunca puede ser importunado por cualquiera de las averías a las que una hélice y sus componentes asociados son algunas veces susceptibles. Una diferencia fundamental entre un turbofan y un turbohélice es que el flujo de aire a través del fan se controla por el diseño del conducto de entrada de aire al motor de tal manera que la velocidad del aire a través de los álabes de fan no se ve muy afectada por la velocidad del avión. Esto quiere decir que la pérdida en rendimiento propulsivo debido a la velocidad que se convierte en un factor límite a velocidades por encima de los 400 nudos para el avión turbohélice, no es un problema considerable para el avión turbofan. Los motores turbofan con posquemadores se utilizan hoy día para propulsar aviones supersónicos que obtienen velocidades por encima de Mach 2.0.

Cuando se compara con un turboreactor de igual empuje, el turbofan tiene la ventaja de un nivel de ruido más bajo para la salida del motor, lo que es un factor importante en todos los aeropuertos comerciales. El nivel de ruido más bajo ocurre porque el motor turbofan tiene por lo menos un escalón de turbina adicional para arrastrar al fan. La extracción de más potencia de los gases de escape del motor a medida que pasan por la turbina adicional (o turbinas), sirve para reducir la velocidad a través de la tobera dando como resultado menos ruido.

Por esta y otras razones (una de las cuales es que el consumo de combustible es menor), el moderno turbofan ha tomado completamente posesión como casi el más idóneo y ampliamente utilizado sistema motopropulsor para todos los grandes aviones convencionales, militares y comerciales.

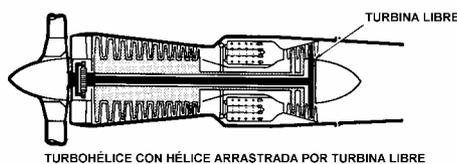
El turbohélice

La propulsión en un motor turbohélice se realiza por medio de la conversión de la mayor parte de la energía del gas en potencia mecánica para arrastrar al compresor, accesorios, y la carga de la hélice. Solo una pequeña cantidad del empuje del chorro (aproximadamente el 10%) está disponible en la corriente de gas de relativamente baja presión y baja velocidad creada por las etapas de turbina adicionales necesarias para arrastrar la carga extra de la hélice.

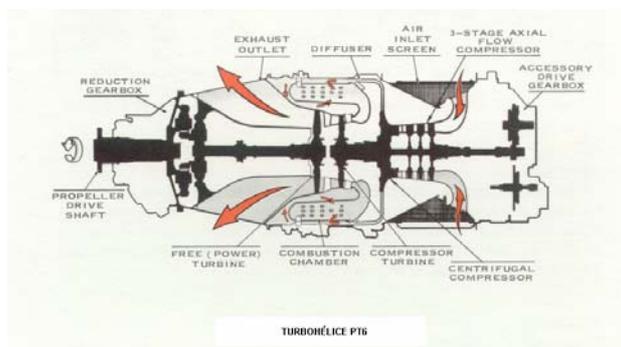


Las características y usos del turbohélice son como sigue:

1. Alto rendimiento propulsivo a bajas velocidades, lo que resulta en carreras de despegue más cortas, pero decae rápidamente a medida que la velocidad aumenta. El motor es capaz de desarrollar alto empuje a bajas velocidades debido a que la hélice puede acelerar grandes cantidades de aire con el avión estático.
2. Tiene un diseño más complicado y es más pesado que un turboreactor.
3. El consumo específico de combustible (TSFC) es el más bajo.
4. Gran área frontal para la combinación hélice motor, por lo que necesita trenes de aterrizaje más altos para los aviones de ala baja, pero esto no aumenta necesariamente la resistencia aerodinámica parasitaria.
5. Tiene posibilidad de inversión de empuje eficaz.



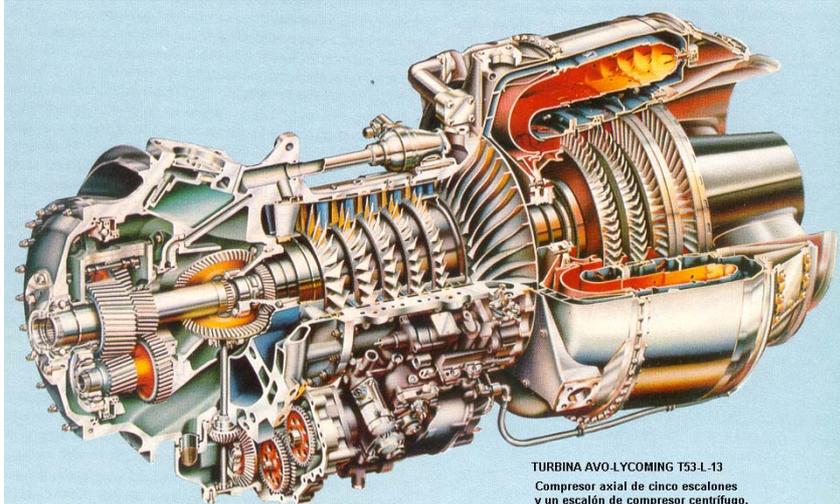
Estas características muestran que los motores turbohélices son ideales para levantar cargas pesadas en pistas de longitudes cortas y medias. En la actualidad los turbohélices están limitados en velocidad hasta aproximadamente 500 mph (805 km/h), ya que el rendimiento de la hélice cae rápidamente con el aumento de las velocidades debido a la formación de ondas de choque. No obstante, los investigadores en Hamilton Standard, división de United Technologies Corporation y otros están intentando superar o abarcar esta limitación experimentando con hélices multipalas de diámetro pequeño y cuerda ancha, que dicen ser más rentables que el turbofan de gran relación de paso, con un 20 por ciento de reducción en el consumo específico de combustible por libra de empuje. Las palas de aluminio lo suficientemente grandes y con la forma correcta para dar bastante empuje y absorber la alta potencia del motor también son demasiado pesadas y flexibles para resistir las cargas centrífugas y de torsión. Las nuevas palas del propfan están hechas de viga de aluminio curvada y ahusada unida a una estructura laminar de fibra de vidrio con forma de perfil aerodinámico rellenas con un material de espuma plástica. Esta construcción compuesta produce una pala más rígida con la mitad del peso de una pala de aluminio convencional



comparable. La ventaja obvia es que el buje de la hélice y el mecanismo de cambio de paso localizado en el interior pueden ser más ligeros y la pala mantendrá mas estrechamente su correcta posición aerodinámica.

El turboeje

Un motor de turbina de gas que entrega potencia a un eje el cual puede arrastrar algo se le conoce como un motor turboeje. La gran diferencia entre un turbo reactor y un motor turboeje es que en un motor turboeje, la mayor parte de la energía producida por los gases en expansión se usa para arrastrar la turbina mas que para producir empuje. Muchos helicópteros



usan un tipo de turboeje de motor de turbina de gas. Además, los motores turboejes se usan ampliamente como unidades de potencia auxiliar (APU) y en aplicaciones industriales a través de un sistema de engranajes de reducción para arrastrar generadores eléctricos y sistemas de transporte de superficie. La potencia de salida de un motor turbohélice o turboeje se mide en caballos de potencia al eje (shaft horsepower).

Los motores turboejes son similares a los motores turbohélices, y en algunos casos, ambos usan el mismo diseño. La potencia puede tomarse directamente de la turbina del motor, o el eje puede arrastrarse por su propia turbina libre, como la turbina libre en los motores turbohélices.