

MOTORES TURBOHÉLICES

La propulsión en un motor turbohélice se realiza por la conversión de la mayor parte de la energía de la corriente de gas en potencia mecánica para arrastrar al compresor, accesorios, y carga de la hélice. Solo una pequeña cantidad (aproximadamente el 10 por ciento) del empuje del chorro está disponible por la corriente de gas de relativamente baja presión y baja velocidad creada por las etapas de turbina 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 cual resulta en cortas carreras de despegue pero que disminuye rápidamente a medida que la velocidad aumenta. El motor es capaz de desarrollar alto empuje a bajas velocidades porque la hélice puede acelerar grandes cantidades de aire a partir de velocidad 0 hacia delante del avión.
2. Tiene un diseño más complicado y es más pesado que un turboreactor.
3. Un consumo específico de combustible (TSFC) más bajo que el turboreactor.
4. Combinación motor y hélice con mayor área frontal lo cual necesita trenes de aterrizaje mayores para los aviones de ala baja, pero que no necesariamente aumenta la resistencia parasitaria.
5. Posibilidad de empuje inverso eficaz.

Estas características demuestran que los motores turbohélices son superiores para despegar con cargas pesadas en pistas de longitud corta y media. Normalmente los turbohélices están limitados en velocidades hasta aproximadamente 500 mph (805 km./h), ya que el rendimiento de la hélice cae rápidamente con velocidades mayores a causa de la formación de ondas de choque. No obstante, los investigadores en la Hamilton Standard division of United Technologies Corporation y otros están intentando superar, o ampliar esta limitación experimentando con hélices multipalas de cuerda ancha y diámetro pequeño, 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.

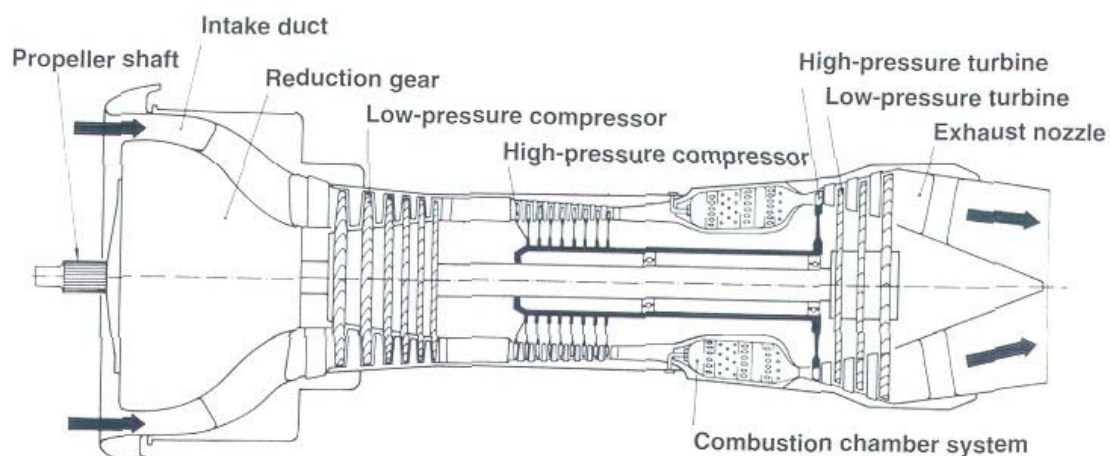


Fig. 16-1

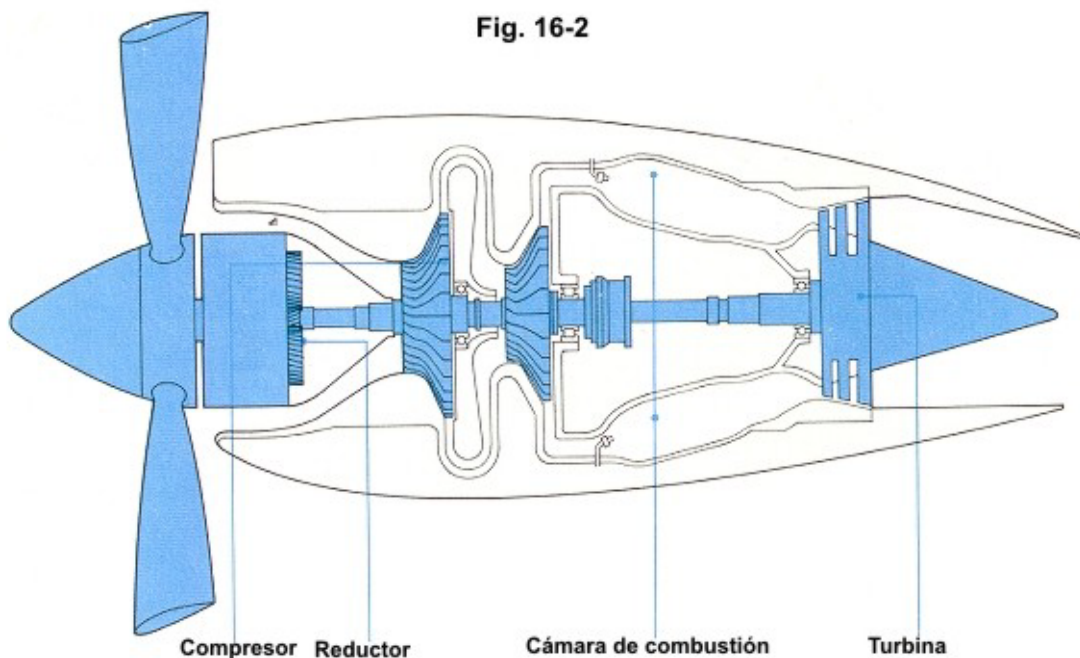
Mientras que el diseño básico de un turbohélice es similar a un turboreactor puro, principalmente difiere en:

- una turbina adicional para arrastrar a la hélice,

- una disposición de dos conjuntos de rotación, y,
- un engranaje reductor para convertir la alta velocidad rotacional de la turbina en una velocidad más moderada para la hélice.

Un turborreactor está diseñado para acelerar una masa de flujo de aire relativamente baja a una alta velocidad de escape, inversamente, un turbohélice está diseñado para acelerar una gran masa de flujo de aire a baja velocidad. Esto como resultado nos da un rendimiento de combustible inmejorable, aunque a costa de la velocidad de vuelo y el ruido en cabina.

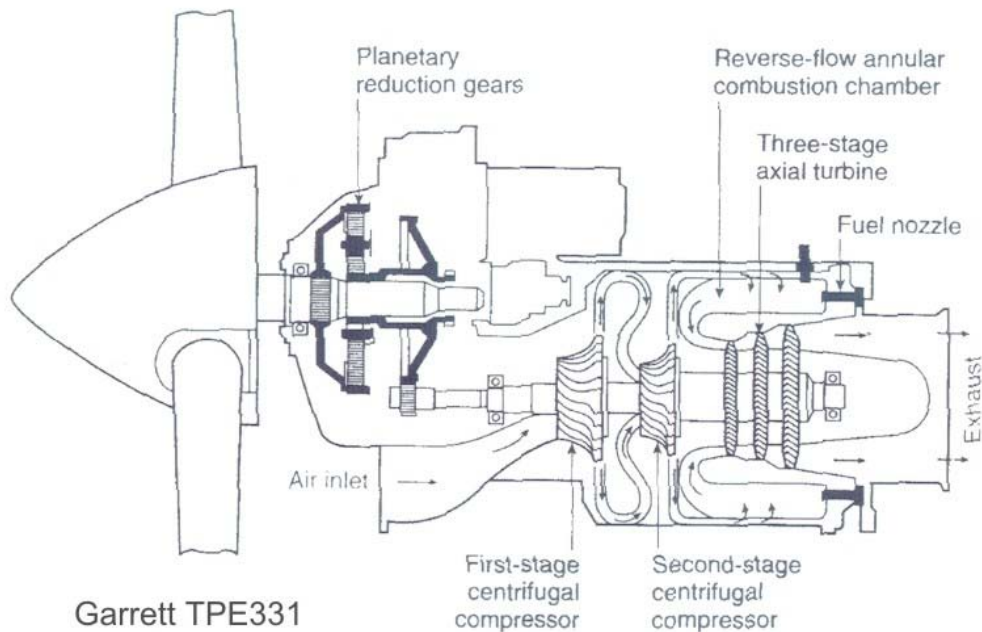
El ciclo termodinámico es igual al del reactor puro. En el reactor puro, la propulsión es el resultado de la reacción sobre la masa acelerada, en tanto que en el turbohélice se obtiene por medio de la tracción de la hélice que recibe la energía procedente de la aplicada a la turbina que la mueve. La velocidad de salida de los gases de escape es pues ya muy reducida, porque la energía cinética de los gases en la expansión ha sido captada casi en su totalidad por las turbinas para mover al compresor o compresores y la hélice. Solo un pequeño empuje residual se obtiene en el turborreactor base, procedente de la energía que aun queda en la expansión después de la última turbina, pero este empuje es muy pequeño comparado con la tracción de la hélice.



La energía obtenida en un turbohélice se puede expresar en forma de potencia transmitida al árbol de la hélice, cosa que no ocurre en el turborreactor, al que solo en el caso de que consideremos la velocidad del avión que propulsa, podemos hallar su potencia equivalente. En un turbohélice funcionando pero estando aun en reposo, hay una verdadera potencia en el árbol de la hélice de forma similar a la de los motores alternativos, esto es, potencia disponible. La cual se puede medir mediante un freno.

Los turbohélices pueden adoptar diversas configuraciones según el turborreactor básico con el que formen un grupo motopropulsor. Las configuraciones pueden ser:

- Turborreactores puros de compresores axiales simples o dobles.
- Turborreactores puros de compresores centrífugos simples o dobles.
- Turborreactores puros de compresores mixtos (axiales y centrífugos).



El compresor centrífugo de dos etapas de una sola cara activa en este motor turborhélice, está arrastrado por una turbina axial de tres escalones.

Fig. 16-3

Atendiendo a la forma en que la hélice recibe el movimiento, los turborhélices pueden ser:

- De turbina libre.
- De turbina ligada.

El motor turborhélice típico puede descomponerse en conjuntos como sigue:

1. El conjunto de la sección de potencia, que comprende los componentes principales usuales de los motores de turbina de gas (compresor, cámara de combustión, turbina, y la sección de escape).
2. El conjunto de la caja o engranaje del reductor que contiene aquellas secciones peculiares para las configuraciones de turborhélice.
3. El conjunto medidor de torque, usado para indicar la potencia desarrollada por el motor turborhélice. El torque del motor o momento de torsión es proporcional a los caballos de potencia y se transmite a través del reductor de la hélice.
4. El conjunto de arrastre de accesorios.

Acoplamiento de la Turbina de Gas, Turbina Libre y Acoplamiento de la Caja de Engranajes a la Turbina

Acoplamiento de la turbina con el compresor

Los ejes de turbina están acoplados a los bujes posteriores de los compresores normalmente por unos dispositivos de acoplamiento y freno. Estos acoplamientos de acero, aseguran el eje de arrastre de la turbina con el compresor, y suelen tener un estriado en el diámetro exterior o en el interior que coincide con el estriado interno o externo del extremo delantero del eje de turbina. El acoplamiento puede tener una rosca a izquierdas en la parte delantera y una pestaña que sujeta el eje al buje posterior del compresor, también tiene un estriado para acoplar el útil o herramienta de apriete en su interior.

Arrastre de los accesorios

En casi todos los motores alternativos, los accesorios tales como magnetos, bombas, alternadores, y puestas en marcha están montados detrás de los cilindros, pero en un motor turboreactor o turbohélice, la tobera de escape ocupa este valioso espacio. Por esta razón, deben elegirse otras localizaciones para los accesorios.

Los motores de turbina de gas tienen abundancia de aire comprimido para operar muchos de los componentes, los cuales en un avión propulsado por un motor alternativo, están arrastrados por engranajes dentro del motor. Algunos de estos accesorios son bombas hidráulicas, unidades de aire acondicionado, y diferentes actuadores.

Otros componentes, tal como bombas de aceite, bombas de combustible, unidades de control de combustible, y puestas en marcha, están arrastrados por engranajes cónicos desde el eje de arrastre compresor turbina. Existen dos localizaciones básicas para montar los accesorios arrastrados por engranajes: debajo del compresor de baja presión y debajo del compresor de alta presión detrás del fan. Pero a pesar de esto la variedad es muy grande, pues hay motores que lo tienen en la parte superior, otros tienen mas de un carter de accesorios, bien buscando una mejor distribución o para cambiar la dirección de giro de un eje.

Engranajes de Reducción

Los motores alternativos giran lo bastante lentos como para que algunos pequeños arrastren la hélice directamente desde el propio cigüeñal. Incluso los motores mayores que arrastran la hélice a través de una serie de engranajes de reducción apenas usan una relación de reducción de mas de 1:2. Los motores turbohélices tienen un problema completamente distinto: puesto que la turbina gira a tan alta velocidad, normalmente se usan engranajes de reducción de planetarios de múltiples etapas, con relaciones en la gama de 1:10 (0'10) a 1:15 (0'0667) consideradas normales.

1. Corona
2. Satélites
3. Núcleo
4. Portasatélites

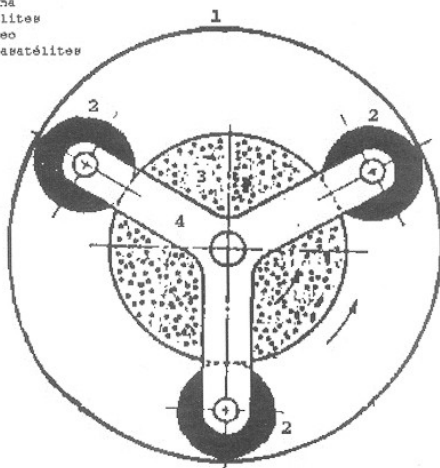


Fig. 16-4 REDUCTOR TIPO PLANETARIO

En el propio reductor se suele encontrar el torquímetro o medidor de par, pues esta indicación es necesaria para conocer la potencia del motor. Así mismo esta señal se emplea para la determinación del ángulo de la pala de la hélice, pues en función del par disponible se adoptará el ángulo de ataque adecuado para que de esta forma el rendimiento sea el óptimo.

Algunos motores además llevan una señal para cuando este valor es inferior a ciertos límites (mini torque), poniendo automáticamente la hélice en bandera.

Existen varias formas de montar los engranajes de reducción en un motor de turbina de gas. En el motor Pratt & Whitney of Canada PT6, la entrada de aire al motor está alrededor de la parte posterior, y la mayoría de los accesorios están montados detrás, el escape sale del motor cerca de la parte frontal, y los engranajes planetarios del reductor de la hélice están en la parte delantera, en línea con el eje compresor turbina.

Un sistema planetario está formado por los siguientes elementos: Corona, núcleo y satélites.

Uno de los engranajes tiene que estar fijo, generalmente suele ser la corona. Imaginando este caso, el funcionamiento es como sigue:

El eje del motor moverá directamente el núcleo, en él engranan los satélites, existiendo una relación de movimiento entre ambos, que está en función de su diámetro o número de dientes. A su vez los satélites engranan en la corona que está fija, lo que hará que estos se desplacen recorriendo la corona. Este movimiento es el que se transmite a la hélice.

En el propio reductor se suele encontrar el torquímetro o medidor de par, pues esta

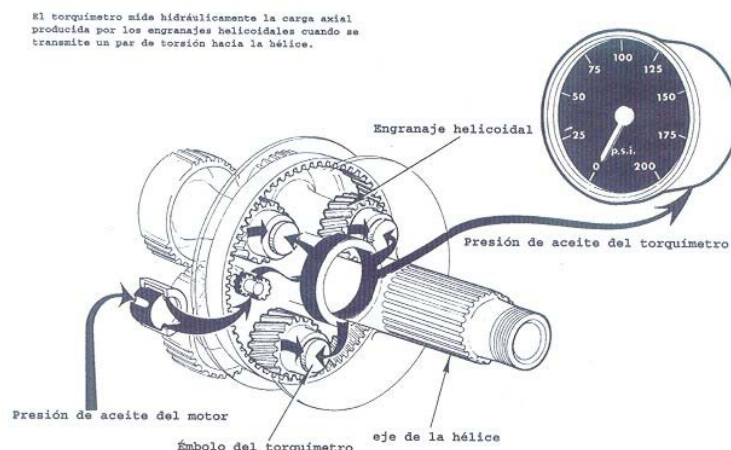


Fig. 16-7 SISTEMA DE TORQUÍMETRO SIMPLE

El gran motor Allison 501 (Fig. 16-8) extiende el engranaje reductor hacia fuera por delante del motor y lo sujeta por medio de montantes. Los engranajes reductores pueden situarse bien por encima o por debajo de la línea central del motor. Esto le permite al fabricante del avión un grado de libertad en el diseño de los conductos de entrada de aire para el motor.

El motor pequeño Garrett TPE331 (Fig. 16-3) tiene el engranaje reductor fuera de él, y como el Allison 501 (Fig. 16-8), puede montarse bien por encima o por debajo de la línea central del motor.



Integración del Motor y Controles de la Hélice

Los motores turbopropulsor se usan en aviones que varían en tamaño desde los grandes transportes cuatrimotores pasando por los ejecutivos de tamaño medio y los relativamente pequeños bimotores. Lo que trataremos a continuación va dirigido hacia un turbopropulsor el cual consta de elementos y conjuntos típicos de muchos aviones turbopropulsores.

A diferencia del motor turboreactor, que produce empuje directamente, el motor turbopropulsor produce empuje indirectamente, ya que el conjunto de compresor y turbina suministra par a una hélice, que, como resultado produce la mayor parte de la fuerza propulsiva que arrastra al avión. El control de combustible del turbopropulsor y el regulador (*governor*) de la hélice están conectados y trabajan en coordinación uno con otro. La palanca de potencia o mando de gases

dirige una señal desde la cabina de mando al control de combustible para requerir una cantidad de potencia específica del motor. Juntos el control de combustible y el regulador de la hélice establecen la combinación correcta de r.p.m., flujo de combustible, y ángulo de ataque de las palas de la hélice para que la hélice cree el suficiente empuje para que proporcione la potencia deseada.

El sistema de control de la hélice está dividido en dos tipos de control: Uno para la operación en vuelo y otro para la operación en tierra. Para el vuelo, el ángulo de pala de la hélice y el flujo de combustible para cualquier ajuste dado de la palanca de potencia están regulados automáticamente de acuerdo a un programa predeterminado. Por debajo de la posición "ralentí de vuelo" de la palanca de gases, el programa de ángulo de pala coordinado con las r.p.m. se hace incapaz de manejar al motor eficazmente. Aquí es donde se encuentra la gama de operación en tierra, llamada gama "beta". En la gama beta del cuadrante del mando de gases, el ángulo de la pala de la hélice no está regulado por el "governor" de la hélice, sino que está controlado por la posición de la palanca de potencia. Cuando la palanca de potencia se mueve por debajo de la posición de puesta en marcha "start", el paso de la hélice se invierte para proporcionar empuje inverso y tener una rápida desaceleración del avión después del aterrizaje.

Una característica del turbohélice es que los cambios de potencia no están relacionados con la velocidad del motor, sino con la temperatura de entrada en turbina. Durante el vuelo la hélice mantiene una velocidad constante de motor. A esta velocidad se le conoce como el 100% de la velocidad nominal del motor, y es la velocidad por diseño a la que se obtiene mas potencia y mejor rendimiento total. Los cambios de potencia están afectados por los cambios de flujo de combustible. Un incremento del flujo de combustible origina un aumento en la temperatura de entrada en turbina y un correspondiente aumento de la energía disponible en la turbina. La turbina absorbe mas energía y la transmite a la hélice en forma de par (*torque*). La hélice, para absorber el aumento de par, aumenta el ángulo de pala, manteniendo constante de esta manera las r.p.m..

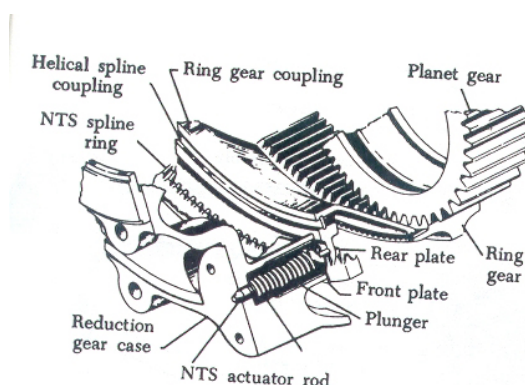


Fig. 16-9 Componentes de la señal de torque negativo

Sobrevelocidad y Dispositivos de Seguridad

Los turbopropulsores disponen de un sistema de control NTS (*negative torque signal*) (mini torque) el cual proporciona una señal que aumenta el ángulo de pala de la hélice para limitar el par negativo del eje. Cuando un par negativo predeterminado se aplica al reductor, la corona estacionaria se mueve hacia delante contra la fuerza de un muelle debido a una reacción de torsión generada por unas estrías helicoidales. En su movimiento hacia delante, la corona empuja dos varillas de actuación a través de la carcasa delantera del reductor. Una o ambas varillas se pueden usar como señal para la hélice y comenzar a aumentar el ángulo de pala de la hélice. Esta acción (hacia un ángulo de pala alto) continúa hasta que se suprime el par negativo, resultando en la recuperación de la operación normal de la hélice.

El sistema NTS (mini torque) funciona cuando concurren las siguientes condiciones operativas: interrupciones temporales del combustible, cargas de ráfagas de aire sobre la hélice, descenso normal con programa de mezcla pobre, condiciones de alto sangrado de aire del compresor con ajustes de potencia bajos, y cortes de motor normales.

El TSS (*thrust sensitive signal*) (señal sensora de empuje) es una característica de seguridad que actúa sobre la palanca de abanderamiento de la hélice. Si ocurre una pérdida de potencia durante el despegue, la resistencia al avance se limita a la de una hélice abanderada, reduciendo los peligros de guiñada en un avión polimotor. Este dispositivo automáticamente aumenta el ángulo de pala y hace que la hélice se abandere.

El conjunto de la hélice, junto con el conjunto de control, mantienen unas r.p.m. constantes de motor para cualquier condición de ralentí de vuelo (gama alfa). Para el manejo en tierra y para el inversor (gama beta), la hélice puede operarse para proporcionar empuje cero o negativo. Típicamente, el modo o gama beta incluye las operaciones desde el 65 % hasta el 95 % de las r.p.m. nominales del motor, y el modo o gama alfa desde el 95 % hasta el 100 % de las r.p.m. nominales del motor.

La figura 16-10 muestra un diagrama simplificado de los controles de gestión de la potencia para un motor Garrett TPE331.

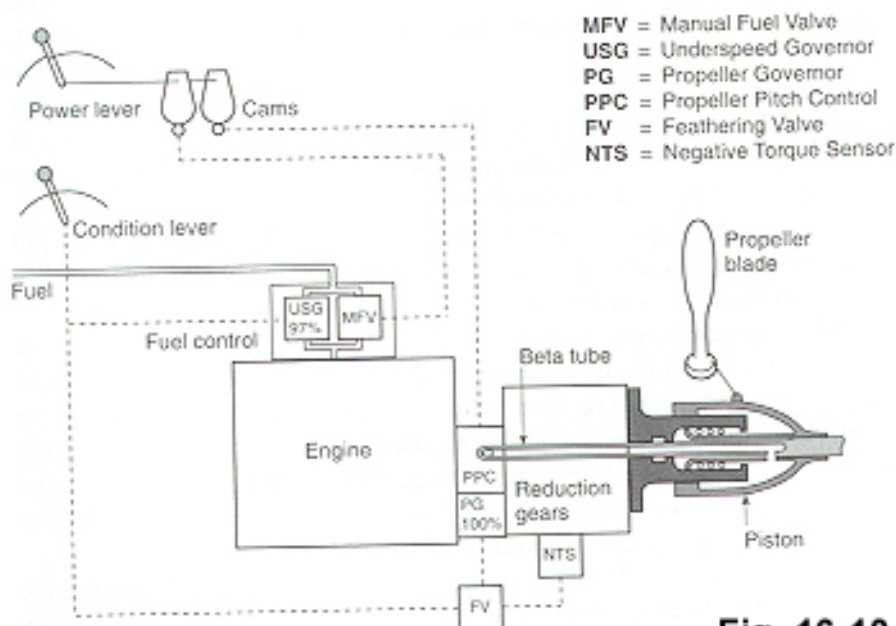


Fig. 16-10

El control de paso de la hélice (PPC) está montado sobre el conjunto de engranaje reductor alineado con el centro del eje de la hélice. Este dirige el aceite hacia dentro y hacia fuera de la hélice para cambiar los ángulos de las palas durante las operaciones en tierra. Un extremo del tubo de transferencia, o tubo beta, se desplaza hacia atrás y hacia delante dentro del PPC para actuar como dispositivo de retroacción. El PPC está operado por una leva desde la palanca de potencia, y durante las operaciones de vuelo, no sirve ninguna otra función que no sea la de actuar como paso de aceite entre el gobernador de la hélice (PG) y la hélice.

El gobernador de la hélice está montado sobre el cárter reductor, y funciona de la misma forma que otros gobiernos de masas centrifugas, controlando la velocidad del motor desde el 97 % hasta el 100 % de r.p.m..

Por debajo del 97 % de r.p.m., el gobernador de baja velocidad (USG), que se encuentra dentro del control de combustible y está operado por la palanca de condición, regula la cantidad de

combustible permitida a fluir hacia el motor, para mantener las r.p.m. seleccionadas cuando el motor está por debajo de la velocidad controlada por el PG.

La válvula de combustible manual (MFV), también dentro del control de combustible, calibra el combustible en respuesta a la demanda de alta potencia de la palanca de potencia.

Una válvula de puesta en bandera (FV) se opera manualmente moviendo la palanca de condición hasta su posición más posterior o automáticamente por el sensor de torque negativo (NTS). Corta el aceite desde el governor de la hélice y el aceite se drena de la hélice, permitiendo que los muelles de abanderamiento muevan las palas a su posición de abanderadas.

Cuando se pone en marcha el motor, la palanca de potencia está en su posición GROUND IDLE y la palanca de condición en la posición LOW RPM. Cuando el motor arranca, los topes de bloqueo de puesta en marcha en la hélice se retraen, y la palanca de potencia coloca el PPC sobre el tubo Beta, haciendo que la hélice se mueva hasta un ángulo de pala de 0°. El tubo Beta está unido al pistón de la hélice y se mueve hacia delante con el pistón a medida que las palas de la hélice se mueven hacia su ángulo de bajo paso. Los topes de bloqueo de ángulo cambian cuando el tubo Beta se desplaza dentro de la posición neutral.

La palanca de condición se usa para ajustar las r.p.m. deseadas a través del USG durante las operaciones en tierra, y la palanca de potencia varía el ángulo de la pala para mover el avión hacia delante o hacia atrás.

Cuando la palanca de potencia se mueve hacia delante, una leva en el PPC deja al descubierto una lumbrera de aceite sobre el extremo del tubo Beta, lo cual permite que el aceite en la hélice se drene dentro del cárter reductor. El muelle de abanderamiento y la fuerza de los contrapesos mueve al pistón y al tubo Beta hacia atrás, aumentando el paso de la hélice hasta que el tubo Beta, con su lumbrera de aceite tapada, alcanza una nueva posición neutral dentro del PPC. El PPC y el tubo Beta hacen que el paso de la hélice responda proporcionalmente al movimiento de la palanca de potencia.

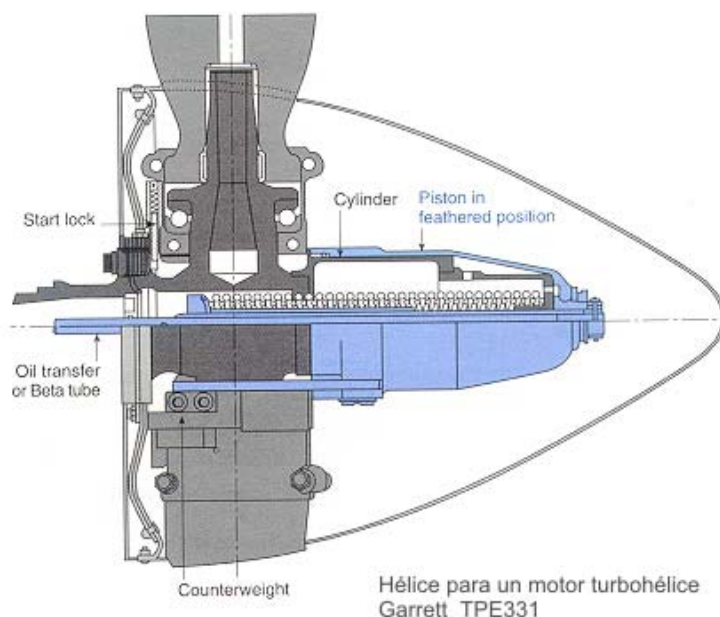
Cuando el ángulo de la pala aumenta, el motor comienza a bajar velocidad, pero el USG, controlado por la posición de la palanca de condición, aumenta el flujo de combustible hacia el motor para mantener las r.p.m. seleccionadas.

Cuando la palanca de potencia se mueve hacia atrás, una leva en el PPC abre un paso en el tubo Beta que dirige aceite a presión incrementada por el governor hacia dentro del pistón de la hélice. El pistón y el tubo Beta se mueven hacia delante, y el ángulo de la pala disminuye hasta que el tubo Beta encuentra una nueva posición neutral. Este ángulo de pala mas bajo hace que aumenten las r.p.m. del motor, pero el USG reduce el flujo de combustible para mantener las r.p.m. seleccionadas.

Cuando la palanca de potencia se mueve a la posición de FLIGHT IDLE (ralentí de vuelo) y la palanca de condición se mueve a un ajuste mas alto de r.p.m. (del 97 % al 100 %), el USG está completamente abierto y ya no afecta al funcionamiento del sistema. Ahora el control de las r.p.m. se realiza por el PG. En este punto, el PPC cubre la abertura en el tubo Beta de manera que ya no se desplaza aceite hacia dentro o hacia fuera de la hélice, y el paso permanece fijo. Entonces la palanca de potencia controla el flujo de combustible a través de la MFV.

Cuando la palanca de potencia se mueve hacia delante desde su posición FLIGHT IDLE, esto abre a la MFV, y al mismo tiempo, la leva del PPC mantiene a la hélice en una posición de paso fijo, permitiendo que las r.p.m. aumenten.

La palanca de condición controla al PG y al USG. Cuando se mueve hasta la posición de TAKEOFF, o HIGH RPM, su varillaje mecánico ajusta al USG hasta el 97 % de r.p.m. y al PG hasta el 100 % de r.p.m.. El USG calibra combustible adicional en el motor para aumentar su velocidad hasta el 97 %. Esto prepara al motor para el despegue.

**Fig. 16-11**

Con el motor rodando al 97 %, la palanca de potencia se mueve hacia la posición MAXIMUM. A medida que las r.p.m. aumentan por encima del 97 %, estas se aproximan al ajuste del PG. Cuando el PG siente el 100 % de r.p.m., este se hace cargo del control de la hélice y aumenta el ángulo de la pala para absorber el incremento de potencia del motor y mantener el ajuste de r.p.m..

Cuando la palanca de potencia se mueve hacia atrás, el flujo de combustible disminuye, y el PG disminuye el ángulo de la pala para mantener las r.p.m. seleccionadas.

En el aterrizaje, el piloto retrasa la palanca de potencia para reducir el flujo de combustible, y cuando ya no hay suficiente combustible para que el PG mantenga el ajuste de velocidad, las r.p.m. caen hasta la gama del USG. En este punto, la palanca de potencia controla a la hélice a través del PPC, y las r.p.m. se controlan por el USG calibrando suficiente combustible para evitar que la velocidad del motor caiga por debajo de la requerida por la posición de la palanca de condición.

Cuando la palanca de potencia se mueve a tope hacia atrás, las palas de la hélice entran en un ángulo negativo preajustado para producir empuje inverso.

Cuando el motor se para en vuelo, la hélice entra en su posición de abanderamiento. La palanca de condición se mueve a su posición más retrasada. Esto cambia a la válvula de abanderamiento y permite que el aceite procedente de la hélice drene en la caja de engranajes.

La fuerza combinada de los muelles de abanderamiento y los contrapesos de las cañas de las palas mueven al pistón hacia atrás, forzando al aceite fuera de la hélice y metiendo a las palas en su ángulo de bandera.

La válvula de abanderamiento también puede operarse automáticamente por el sistema del sensor de torque negativo (NTS). Cuando el sensor de torque negativo en el reductor siente una pérdida de torque positivo, el aceite se dirige a la válvula de abanderamiento, cambiándola a la posición de bandera.

Para desabanderar esta hélice se usa una bomba de aceite arrastrada por motor eléctrico. Al aceite procedente del depósito del sistema de lubricación del motor se le incrementa la presión por medio de la bomba de desabanderado y se le dirige a través del tubo Beta hacia dentro de la hélice. Esto mueve al pistón hacia delante y a las palas a su posición de paso bajo.