Radiales vs en Línea

Autor wert
domingo, 18 de mayo de 2008
Modificado el sábado, 24 de mayo de 2008

Radial vs en Línea ¿Que tipo de motor es mejor, el de pistones en línea o en disposición radial? Después de leer un poco sobre el tema, me permito hacer una disertación (acertada o no) del pq hay dos tipos de motores en la aviación.

Radial vs en Línea

¿Que tipo de motor es mejor, el de pistones en línea o en disposición radial?

El hecho de que ambos tipos hayan coexistido durante toda la historia de la aviación, ya nos indica que la pregunta es difícil de responder, incluso que no tiene sentido.

Un primer análisis podría concluir que la pregunta en realidad es "¿refrigeración líquida o por aire?".

En los Radiales, cada pistón tiene un gran flujo de aire y hay espacio para las aletas del radiador. Hay pocos ejemplos de Radiales con refrigeración líquida (Nesterov, Salmsons 2, BMW 803), al tener los pistones separados, hay mucha "circuiteria" y resultan pesados y complicados de montar.

En los Lineales los cilindros están muy juntos en comparación y se tapan unos a los otros el flujo de aire. Hacer un circuito líquido no incrementa mucho el peso. Además, con el bloque de motor integral, los circuitos se mecanizan en el bloque y se evitan escapes del refrigerante. Todos los motores lineales de más de 6 cilindros o 300hp usan la refrigeración líquida.

La refrigeración líquida es más eficiente y permite mayores rpm (revoluciones por minuto) o Presiones de Entrada (1) sin sobrecalentar el motor. En cambio, tener un líquido refrigerante a gran presión y temperatura (100-300°C) es complicado de diseñar y mantener.

La refrigeración por aire es menos eficiente dependes más de las condiciones atmosféricas y no permite "exprimir" tanto el pistón. Pero no tiene juntas ni mecanismos que pueden fallar. Su uso no complica el diseño del motor, pero hacer las aletas delgadas y juntas requiere de buena maquinaria.

En combate, el líquido es muy vulnerable, una bala de 7mm puede perforar el radiador y el motor sin presión de refrigerante se gripará en minutos. Un cilindro refrigerado por aire, ha de recibir de lleno un 20mm para que deje de funcionar y seguramente el resto del motor seguirá sin problemas.

Aunque muchas de las diferencias son por el tipo de refrigeración, un análisis mas profundo muestra que son las diferencias estructurales que han marcado sus desarrollos y las preferencias por un tipo u otro. Durante años un tipo de motor a eclipsado el otro, pero con un cambio de tecnología repentino o prejuicios de los ingenieros, la balanza se inclina hacia el otro lado.

Veamos un poco la historia que han seguido el diseño de motores.

Aparte de los motores a vapor de aeronaves, el primer motor que funciona es el de los Wrights. En 1903, basados en los motores en línea de los automóviles el mecánico Charlie Taylor consigue montar un 4 cilindros en línea, muy rustico pero que da el pego con 70kg aprox. y 16hp. Todo fabricante de la 1era década tomó como modelo haciendo las correspondientes mejoras. Estos motores ya tenían todo lo que hay que tener, carburador, válvulas de seta, refrigeración por aire / liquido, V8 etc. Pero eran poco fiables. Utilizando acero y bronce, estos motores sufrían de sobrecalentamiento, “back-fires” (2) en el carburador, desgaste repentino de componentes y muchas vibraciones (->roturas de tuberías y soldaduras) pudiendo fallar tanto en 10 min. como en 10h...

En 1908 hay el primer cambio de balanza con el Gnome Rotary. Un 7 cilindros en estrella forjados en aleación de níquel, 4 tiempos, 1700rpm, 7980cc, entrada de mezcla vía pistón, salida por válvula en la cabeza. No mejora la potencia respecto a otros motores contemporáneos y para evitar detonaciones en el carter se sobrealimenta de fuel, con lo que consume mucho fuel y lubricante, pero era ligero y sumamente fiable. El primer avión (Henry Farman) con Gnome en participar en carreras, ganó 2 en dos días consecutivos con el mismo motor, algo inaudito.

No es un motor de movimiento reciproco. Los pistones rotan entorno a un eje y los pistones rotan sobre otro eje un poco desplazado del primero, con lo que no hay casi vibraciones. El hecho de que los cilindros, solidarios con la hélice, dieran vueltas solucionaba el problema del sobrecalentamiento.

En 1914, con el inicio de la Gran Guerra, los motores rotatorios dejan paso a los lineales. Su gran par y limitadas rpm, limitan mucho sus posibilidades para los aviones de combate por lo que la en esta contienda este tipo de motores tendrán su canto del cisne en aviones como el Camel o el Fokker DR.I.

Nuevos motores en línea fabricados con las nuevas aleaciones de níquel, molibdeno etc. Bloque de cigüeñal de una pieza (mas rigidez y menos vibraciones), cigüeñales forjados (no mecanizados) con contrapesos (guitarras), válvulas inclinadas dejando mas área en la cabeza para evacuar el calor, la utilización de Stellite(3) en el asiento de las válvulas, mecanismos reductores que permiten mayor rpm son las mejoras más relevantes. Se incrementa la fiabilidad al evitar el desgaste de piezas con lubricantes minerales que “limpian” de impurezas, forzar lubricación del piñón de la biela y encapsular todo el mecanismo dentro del bloque del motor. Destacar los Austro-Daimler de 6 cilindros, el Liberty V-12 y los V8 Hispano-Suiza (SPAD, SE.5) que marcarían el futuro a seguir.

En el periodo de entre guerras la aviación deja de ser un fin para convertirse en un negocio. Los motores ya no necesitan mantenimientos cada 3 horas. Aunque al fin de la guerra los lineales marcan la pauta, tres avances vuelven a invertir la situación a favor de los radiales:

a) Se mejora mucho el cilindro, haciendo la cabeza de aluminio y aumentando el área refrigerante con lo que los motores radiales “hijos” no tienen problemas de sobre temperatura.

b) También se desarrolla el mecanismo de reducción epicíclico (4) permitiendo aumentar las rpm y minimizar el problema de vibraciones de torsión en los radiales.

c) En 1920, la NACA(5) investiga un carenado para motores radiales que reduce notablemente la resistencia aerodinámica incluso genera un empuje adicional, equiparando los radiales a los lineales en cuestión de velocidad punta.

Estas innovaciones hace que casi todos los motores comerciales sean radiales, dejando de lado los lineales por su complicada fabricación. Ejemplos de la evolución son el 1921 Raf 8 de 14 cilindros 300hp, 1929 Bristol Júpiter de 500hp, o 1932 Gnome-Rhône Mistral Major de 900hp.

Los lineales tienen los cilindros dispuestos a lo largo de un cigüeñal. Esto genera problemas de torsión y vibraciones y los cilindros tienden a desalinearse. Se necesita un monobloque de motor robusto y pesado para evitar torsiones, calibrar muy bien el cigüeñal e ir añadiendo rodamientos para evitar vibraciones. Los Radiales, al actuar en un solo punto no necesitan “inmovilizar” los cilindros.

En cambio los Radiales, al tener un cigüeñal “ligero” transmiten los impulsos directamente al eje de la hélice. Se provocan fuertes vibraciones de torsión entre el cigüeñal y la hélice, haciendo complicado el mecanismo de reducción, solo mecanismos reductores tipo planetario y epicíclico que tienen 3 o 4 engranajes “en paralelo”, pueden aguantar estas fuerzas.

Los motores lineales quedan relegados a algunos cazas y a competiciones como la Schneider Trophy. Una carrera de velocidad pura, donde la aerodinámica y máxima potencia es lo único que importa. Estos son V12, monobloque de aluminio para dar mas rigidez, 4 válvulas por cilindro, refrigeración líquida y compresores de gran velocidad. Los radiales tienen limitadas las rpm por las levas (disposición siempre complicada) y el compresor que va directo al cigüeñal. Los lineales permiten un rango de rpm's más grande aunque signifique reducir la vida del motor. Un Napier Lion (1917) de 470hp a 2000 rpm y ratio de compresión 5:1, se podía forzar hasta 1400hp a 3900rpm y r.c.10:1 y que dure para las 200 millas de una Schneider.

Otro factor es que aunque se ha mejorado mucho la refrigeración por aire, en condiciones de altura (>5000m) los radiales no pueden competir con la refrigeración líquida de los lineales. Con lo que hay dos tendencias en los cazas, o más maniobrable pero de baja cota o más pesado pero con capacidad de trepar a alta cota. Esta “disyuntiva” se mantendrá hasta finales de la WWII.

Al principio de la WWII, los países europeos estaban tan fuertemente influenciados por el Schneider Trophy que todo caza tenía que ser motor en línea por definición. Solo en cazas navales se ven radiales, donde peso en despegue y fiabilidad importan. La familia Merlin y la DB601 son los V12 que marcan la élite.

No hay grandes saltos tecnológicos (excepto en el compresor) si no mas bien en perfeccionar lo ya existente y métodos de producción. Un buen diseño en la entrada al carburador o pistones podía incrementar notablemente la eficiencia o potencia del motor.

La progresión del Merlin durante la guerra se basó en incrementar la presión de entrada (con compresores de varias etapas y de varias revoluciones) gracias a la disponibilidad de fuel de mayor Octanaje. Tres versiones con similar cubicaje y peso:

Año	Presión	Oct.	HP
1940	6 Lb/in ²	86	1040 Merlin II/III
1943	12	100	1545 Merlin 61
1945	21-25	150	2000 Merlin 130

El DB601, no mejoran al no tener combustible de 100-150 octanos.

DB601A-1 809 kW 2,400 rpm, B4 fuel

DB601E 993 kW 2,700 rpm, B4 fuel

Si bien los lineales basan su progreso en la presión de entrada, los radiales incrementan potencia incrementando el cubicaje. Pero su pobre perfil aerodinámico sigue siendo un problema.

En 1942 aparece el FW-190 con su BMW 801A. Un doble estrella de 14 cilindros, 41litros 1600Hp a 2700rpm. Un ventilador fuerza la entrada de aire refrigerante y se hace pasar por conductos en la cabeza del pistón. El aceite tiene su radiador en la parte frontal del anillo del carenado. Aunque muy mejorada la refrigeración y un compresor mecánico de 2 velocidades, sigue perdiendo prestaciones a los 6000m. El gran avance no es el motor en sí, sino su instalación. Con solo 1,2mØ de diámetro, todo es encapsulado en su carlinga aerodinámica que no sobresale del puro del avión, nada que ver con el Ash-62 1,4mØ del Mosca o los R-1820 y R-1830 americanos. El FW-190 y LA-5FN (ASh-82) con una configuración muy similar, se equiparan en velocidad punta con los Bf-109 y Spitfires. Los Rusos no copiaron (esta vez) de los Alemanes, era el camino lógico a seguir.

Otro ejemplo lo encontramos con el J2M2 Raiden Model 11 Japonés que con un carenado más alargado consigue una línea aerodinámica del MK4R-A Kasei 23 (14 cil. 42L, 1800hp, 1,3 mØ). Se diseñó en el 39 pero su puesta en producción no llegó hasta el 44.

El único punto flaco de los radiales era su mal comportamiento en altura. Esto era debido a lo difícil de instalar compresores mecánicos con multiplicador de revoluciones, doble etapa, embragues etc.. y sobretodo la refrigeración del aire comprimido o intercooler(6). Normalmente conectados directamente al cigüeñal para ahorrar energía, en un radial no hay mucho espacio si no se quiere alargar demasiado el motor y detrás de los pistones complica la obtención de aire fresco para refrigerar el aire comprimido.

Un turbocompresor no está ligado al cigüeñal, solo necesita de un conducto que importe los gases de escape y devuelva el aire de entrada. Se autorregula en rpm. Se puede montar en cualquier sitio, con intercooler tan grande como se quiera y la admisión de gases lejos del aire calentado por el motor. Se instalan tanto en lineales como en radiales, pero son los radiales los que salen claramente beneficiados del invento.

Paralelamente al J2M2 –11 se testea el J2M2 –34. Mismo motor MK4R-C Kasei, pero substituyendo el compresor mecánico de doble etapa por un turbocompresor justo debajo del motor. Esto le permitía mantener los 1400Hp a 10000m en vez de los 5.500m. Solo tres prototipos de Model 34 se finalizaron ya que los turbocompresores son simples en concepto pero complicados de construir.

Normalmente giran a 60.000 rpm con temperaturas de 500°C y han de aguantar las “caricias” que un motor de 2000Hp (1.500.000 watts) le puede propinar.

General Electric es la única empresa en desarrollar un turbocompresor fiable y se instalan en los P&W R-1830-49 (P-43), P&W 2800 (P-47), Wright R-3350-23(B-29) y Allison V-1710 (P-38)

Se llega a un punto donde aumentar la potencia significa volver a incrementar cubicaje y el peso del motor. De 25 litros a 40, 50, 60 litros. A primera vista no parece haber problemas, se hace un V14 o un R18 pero de hecho, sobrepasar los 2000Hp es más difícil de lo que parece.

En los lineales, aumentar a V14 incrementa demasiado el peso y el volumen (demasiado largos). Se optan por tres configuraciones, W, X y H. La W, con Napier Lion (1919-1930) como único en producción(7), tiene los cilindros separados y no es posible encapsular todo en un bloque. La configuración en X, consiste simplemente en unir 2 motores en V compartiendo un cigüeñal. Esta configuración es muy problemática por la unión de 2 o más bielas en un mismo codo (eje) y su refrigeración con los pistones tan separados. Ningún motor en X entró en producción (DB604, R&R Vulture, Isotta Fraschini Zeta, Lycoming XR).

Los H consisten en dos motores planos o Boxxer, con cilindros a 180°, un “submotor” encima del otro a modo de sandwich y conectados por un tren de engranajes. Se evitan contrapesos y vibraciones, es muy compacto y permite alcanzar 3500rpm. La configuración en H ya se estudiaba desde los 30’s con la idea de “esconder” el motor en el ala ya que suelen ser largos pero aplanados. En USA(1939) Lycoming XH-2470 y Pratt&Whitney H-3730 empezaron costosos proyectos para producir un H de más 2000HP, hasta 5000Hp del XR-7755. Estos proyectos se cancelan, ya que coexisten en su desarrollo con los R-2800 y R4360 y logísticamente ya se tiene la maquinaria de producción especializada en radiales.

Los radiales evolucionan pasando de 7 a 9 cilindros por etapa (2x9=18 cilindros). Parece un cambio pequeño, pero obliga a que la unión entre la biela principal y las secundarias se alejen del centro. Lo que antes eran orbitas elíptico-circulares, ahora son elípticas. Si sumamos que los pistones dan 180Hp las vibraciones de segundo orden, antes despreciables, ya no lo son tanto. Con 1200Hp por etapa, el cigüeñal es forzado fuera del eje de rotación. Absorbedores dinámicos en los contrapesos del cigüeñal, situar las bielas principales a 20° y rediseñar la forma y ensamblaje del cigüeñal son las soluciones que toman unos 10 años de test y error. P&W R-2800, Bristol Centaurus, Wright XR-3350 46L y Svhetsov Ash-73 son motores de similares características; 18 cilindros, 2000-2800Hp, unos 50L cubicaje, tan utilizados en cazas como en bombarderos. Solo el R-2800 entró en combate en forma de F4U o P-47.

Al final de la WWII los reactores irrumpen con fuerza, pero todavía se tardan unos 10 años en hacerlos fiables y con un consumo aceptable para largas distancias. Este es un periodo donde los Radiales dominan totalmente el mercado en forma de turbocompound.

En Europa, históricamente favorable a los lineales, no tiene recursos para desarrollar su industria.

El radial más potente fue el multietapa P&W R-4360. 28 cilindros en 4 etapas, 71L y 4300Hp. Se vuelve a un 7 cil por etapa y se disponen en forma helicoidal para mejorar la refrigeración de las últimas filas. Diseñado a toda prisa, solo un año, se recogen las piezas (muy testeadas) del R-2600 y se montan en un bloque de motor. La mayor dificultad son los mecanismos para accionar las válvulas, difíciles de montar, pero no presentan ningún problema serio.

En los lineales solo el Napier Sabre II, un 24H de 3000Hp a 3800 rpm (pot/peso=2.06 kW/kg) consigue salir en producción para el Tempest. La utilización de válvulas de camisa encarece la producción en masa y no llega a tener “descendientes” por la era de los Jets.

Bueno, al final seguimos con la pregunta, ¿que es mejor, radial o lineal?.

Parece ser que los Radiales quedan como amos de los 3000-4000Hp y los lineales, a excepción del VD-4K Ruso quedan al margen. Pero, y esta es una opinión, creo que los radiales quedan justamente al pico de sus posibilidades. El sistema de Biela principal queda limitado a 9 cilindros y 1300Hp y ya se le pueden poner absorbedores etc, que la fabricación del cigüeñal se complica de manera exponencial. El situar doble, cuádruple etapas tiene su límite, ya que los pistones traseros no se refrigeran. De hecho el BMW 803, un 24 cuadri-radial, era refrigerado por líquido, dando una pobre relación potencia peso (0.97 kW/kg) o el Wright R-2160 de 6 filas 2500Hp. Los P&W R4360 y Wright R-3350 llegan a un punto de sofisticación que hacen difícil su mantenimiento.

Mi apuesta para un hipotético >5000Hp sería un H, donde no hay límite de cilindros, su configuración boxxer permite 3000-4000 rpm, refrigeración líquida a presión, 4 válvulas por cilindro sin complicaciones (no como en los radiales) y posibilidad de desembragar uno de los dos “submotores” con lo que tienes a efectos prácticos un “bimotor”. En definitiva, una evolución del Fairey P24.

Y aquí alguien podría objetar, ”Y que es un Boxxer si no un radial de 2 cilindros con bielas de lineal?” .

Wert – AVA 2008

Anexos

(1) Presión de Entrada: presión de aire y/o mezcla justo antes de entrar al cilindro. A más presión, más masa de aire/mezcla se quema en cada ciclo del motor, dando mayor potencia por ciclo.

(2) Back fire: En la entrada del cilindro se producen las condiciones para que el combustible se inflame llegando al carburador y saliendo la llamarada por la entrada de aire. Normalmente indica sobrecompresión y cilindros muy calientes. Puede destruir el carburador.

(3) Aleación de Cobalto, gran dureza, resistencia mecánica y química a altas temperaturas.

(4) tipo de engranaje donde sobre un plato dentado se engranan varios (3-4) piñones cónicos (lateral sobre el plato, mirando al centro). Encima se coloca otro plato tocando el lateral superior. Según la inclinación de los conos se consigue una reducción de las rpm.

(5) Antecesora de la NASA.

(6) Radiador para enfriar el aire comprimido por el compresor, situado antes del carburador. Al enfriar, se permite más masa de aire por ciclo y se evitan detonaciones antes de tiempo.

(7) En 1909 Anzani fabrica un W de 3 cilindros y 25Hp a 1200 rpm.