

La propulsión mediante chorro

Ballfire <alejandro_aero@yahoo.es>

7 de junio de 2004

1. Introducción

Bien, para empezar, deseo desde este artículo presentar mis disculpas por la poca actividad aérea que he desarrollado en los últimos dos años (joer, ya van dos).

Este artículo surgió una noche, dando la tabarra a nuestro ilustre instructor jefe (Víbora) acerca del “surge” de los compresores. Lo cierto es que jamás había oído hablar de tal cosa, y me había pasado un buen tiempo volando Flanker y otros simuladores (todavía me queda por ver algún simulador que simule este efecto). Esto me hizo pensar acerca de que, siendo un fanático de la simulación, nunca había ido al fondo, a la teoría de estos aparatejos (¡¡por fortuna ahora tengo más teoría de la que quisiera!!) y la verdad es que hasta cierto punto es comprensible.

Sólo los libros enfocados a diseño y operación de turbomaquinaria hablan de estas cosas (después de todo no todo el mundo tiene un compresor axial de 7 escalones en el salón de casa); así que, siendo consciente de lo poco que estaba aportando al ala a la hora de volar o crear misiones, me he decidido a aportar instrucción teórica.

Debo pedir perdón de antemano porque tal vez este artículo que me dispongo a escribir peca de excesivamente académico y/o formulado. Haré mi mejor esfuerzo para hacerlo accesible y sencillo cuando me sea posible, y trataré de obviar los desarrollos matemáticos para poner sólo las fórmulas que expresen un funcionamiento y que tengan un efecto directo en la actuación del sistema o que sean de especial interés a la hora de entender el funcionamiento del sistema.

Por supuesto, acepto toda clase de sugerencias/críticas o preguntas acerca del tema; aún cuando estoy realmente lejos de las actividades de vuelo, jamás he dejado de leer los foros, así que si alguien tiene una duda acerca de este artículo, simplemente que pregunte.

Para aquellos que tengan curiosidad por saber de dónde ha salido toda esta información, ¡mis fuentes son las mejores en este país! La información contenida en este artículo ha sido sacada en su mayor parte de las clases de “Sistemas de Propulsión”, una asignatura de 2º curso que se imparte en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Así pues, ¿Dispuestos a saber tanto de motores (o casi) como un alumno de 2º de la ETSIA?

Nota una vez terminado el artículo: Como me temía, la cosa ha quedado más bien teórica y muy enfocada a rendimientos (lo siento, estoy aspirando a ingeniero :-P) y teoría. Creo que escribiré un segundo artículo enfocándolo más desde la perspectiva descriptiva y atacando las partes del motor.

2. La Propulsión

Atención: Los no amantes de la Física pueden calificar esta sección de plomazo absoluto (y parte de razón no les falta oiga)

Podemos entender como propulsión el hecho de moverse por uno mismo (realmente esta definición es falsa y una tonterida, pero es intuitivamente muy fácil de “ver”). Para nuestro área de interés (el vuelo atmosférico) nos estaremos moviendo en un medio que se opone al avance en su seno, produciendo una fuerza conocida como “Resistencia”, “Drag” o “Rozamiento aerodinámico” (este último término muy poco usado)

Así pues, debemos ahora echar un pequeño vistazo a lo que un tal Newton enunció en cierto momento (sobre el s. XVII)

- Una partícula no variará su cantidad de movimiento ($\vec{p} = m\vec{v}$) si no se ejerce ninguna acción externa sobre ella (o si la resultante de las acciones es nula).
- La derivada de la cantidad de movimiento es la “Fuerza” que actúa sobre la partícula $\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$
- Siempre que actúa una fuerza, aparece una igual y contrario de la misma magnitud.

Una de las consecuencias que se extrae de esto es que dado un sistema de partículas aislado (en el universo sólo existen estas partículas), su cantidad de movimiento se mantiene constante. (Esto es importante)

Así pues, si yo, aviador, quiero pasar de estar quieto a moverme, está claro que debo variar mi cantidad de movimiento a través de una fuerza (el tan usado empuje de nuestros motores).

Pero, ¿De dónde sacaré yo esta fuerza?, si estuviese yo sólo en el universo, tendría que:

$\sum \vec{F}_{exterior} = 0$ esto es, no hay nadie en el universo para hacer una fuerza sobre mí, luego, $\frac{d}{dt}\vec{p}_{propio} = 0$ ¹ luego, mi cantidad de movimiento no puede variar, y estoy condenado a ¡¡moverme como me estaba moviendo!! (es lo que tiene la 1ª ley, un latazo eso de flotar en el vacío cósmico)

Sin embargo, si tomamos la consecuencia del tercer principio de Newton, y suponemos un sistema formado por tan sólo dos partículas (yo con mi avión como un todo, más “algo más”) tenemos que:

$$m_{avion}\vec{v}_{avion} + M_{otro}\vec{V}_{otro} = constante$$

¹Como no conozco el nivel matemático del lector, debo hacer aclaraciones acerca de algunos conceptos que a algunos niveles se dan por conocidos, asimilados y requejados. La derivada, expresada por $\frac{d}{dt}()$ da una idea de la “variación” de una magnitud con respecto a otra. Así, por ejemplo; si $\frac{d}{dmujeres}(dinero) = -500$ significa que el dinero, con respecto a la variable mujeres tiene una dependencia inversa (cuantas más mujeres menos dinero) y que varía en una “tasa” de 500; si esta tasa fuera de -5, vendría a decirnos que sí, que son una ruína, “pero menos”. Así, también pueden tomar valores positivos, como: $\frac{d}{dedicinOT}(vmitos) = 5000$ que expresaría que el número de vómitos en este país aumenta muchísimo conforme aumenta el número de edición de Operación Triunfo (¿Quién dijo que las matemáticas no se aplican al mundo real?)

¿Podré moverme ahora? ¡Sí! Ahora sí, si yo provoco que el producto de masa por velocidad del otro disminuya, para que esta magnitud conocida como cantidad de movimiento sea constante, **mi** cantidad de movimiento aumenta (3º principio).

De hecho, como sólo estamos yo y el otro en el universo, tengo que:

$$\sum \vec{F}_{ext} = 0 = \frac{d}{dt} (m_{avion} \vec{v}_{avion} + M_{otro} \vec{V}_{otro})$$

si suponemos que en un principio nada se mueve ($\sum mv = 0$) resulta que tras “mover” lo otro tenemos que:

$$m_{avion} \vec{v}_{avion} = -M_{otro} \vec{V}_{otro} \Rightarrow \vec{v}_{avion} = -\frac{M_{otro}}{m_{avin}} \vec{V}_{otro} \quad (1)$$

Bien, ahora, podemos movernos, pero... ¿A qué precio? ¿Cuánto hemos gastado? ¿nos arruinaremos? La respuesta es típicamente gallega; depende. Podemos establecer una pequeña consideración energética (sí, esto me está quedando un tanto ofuscado)

Partamos de que antes nada se movía, luego, tras nuestra acción, ¡las cosas se mueven! Hemos comunicado Energía Cinética al sistema². Pero claro, la energía no está barata, y nos interesa minimizar la energía que gastamos y quedarnos sólo con la energía que nos beneficia a nosotros (la de NUESTRO movimiento), veamos:

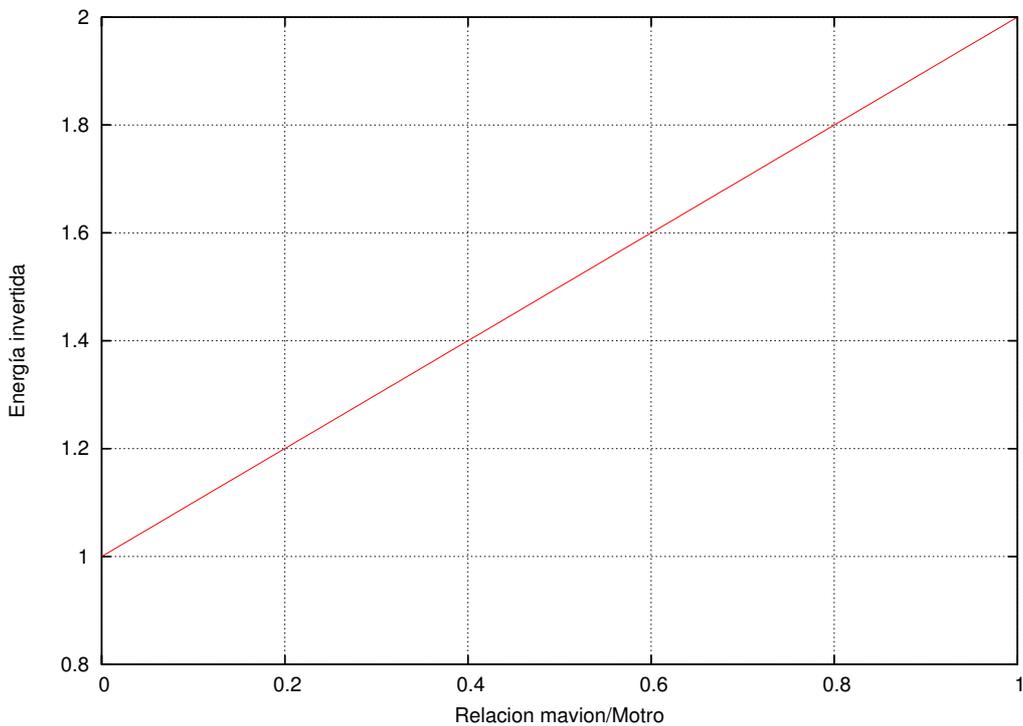
$$Energía_{gastada} = \frac{1}{2} m_{avion} v_{avion}^2 + \frac{1}{2} M_{otro} V_{otro}^2$$

Teniendo en cuenta la ecuación 1 esto queda:

$$Energía_{gastada} = \frac{1}{2} m_{avion} v_{avion}^2 \left\{ 1 + \frac{m_{avion}}{M_{otro}} \right\}$$

y esto, para obtener una velocidad determinada, tiene un aspecto como:

²La energía cinética es una clase de energía (la energía tal vez se pueda definir como la capacidad de desarrollar trabajo) que está íntimamente relacionada con el movimiento; cuanto mayor sea la velocidad mayor es la energía cinética (de hecho, $E_c = \frac{1}{2}mv^2$). Para tener una pequeña idea experimental, os propongo esta experiencia: Se elige un muro de casa más o menos hermoso; se inicia un movimiento lento hacia él hasta que el muro nos detiene; habremos notado una ligera acción del muro sobre nosotros; pero apenas nos habrá dolido, pues no había mucha energía en tu movimiento. Repitamos ahora el experimento. Aléjate unos 20 metros del muro, coge impulso y trata de introducirte en el muro a la mayor velocidad posible cual energúmeno desbocado.¿ya?.....ESO que has notado, es la consecuencia de la energía de tu movimiento. (¿Qué tal por el hospital?)



Y con esto deducimos que, nuestro proceso de propulsión es más eficiente cuanto mayor sea la masa del “otro”, o lo que es equivalente; cuanto menor sea la velocidad comunicada al otro medio que alteramos. Esto explica porque la rueda es un sistema de propulsión tan cojonudo, como el “otro” es la tierra, y ella es una gorda muy gorda apenas desperdiciamos energía en el proceso propulsivo.

Lamentablemente, cuando uno vuela, lo deseable es mantener la tierra lejos de uno, así pues, no podemos recurrir a la tierra para apoyarnos en ella al propulsarnos. Recurrimos entonces al aire (u otro fluido) que tiene una masa mucho menor (por lo tanto, con poca “eficiencia”)

Bien, hagamos resumen; hemos visto que para propulsarnos necesitamos a un “otro” (en nuestro caso el aire); y que nos moveremos de forma más eficiente cuanto mayor sea la masa del “otro”.

Uff, esperemos que la siguiente sección salga un poco más amena.

3. Propulsión a chorro

Y bien, centrémonos ahora en expresar de forma esquemática qué es un motor de propulsión mediante chorro.

Un motor de este tipo se puede concebir como una caja negra a la que se le mete por un lado unos gases (aire en nuestro caso) a una velocidad v_0 y salen estos gases (un poco cambiados) por el otro lado a una velocidad $v_0 + v_{adicional} = v_s$. Es decir, hemos cogido unos gases y les hemos comunicado una velocidad, hemos cambiado su cantidad de movimiento. Como hemos explicado antes, cuando yo cambio la cantidad de movimiento (utilizando para esto la energía

contenida en un combustible) de un cuerpo que está sólo conmigo en el universo, él, agradecido también cambia **mi** cantidad de movimiento, esto es, él ejerce sobre mi una fuerza que cambia mi manera de moverme. La fuerza que los gases generan sobre mi se conoce como “Empuje” (¿A que os suena?)

Como ya hemos visto, esa fuerza se expresa como directamente proporcional a la “variación” de la velocidad del aire que hemos cogido (en realidad es con la derivada, pero en este caso es equivalente) y tiene una expresión (realmente esta es la expresión de empuje no instalado para una tobera de salida adaptada; lamento decir que la cosa es complicada...):

$$E = (G + c) v_s - Gv_0$$

En donde, G es la cantidad de kilogramos de aire que metemos a nuestro motor por segundo (un motor más o menos normal de hoy en día tiene un gasto; así se llama a esta magnitud; de 30 Kg/s, si estuvieses encerrado en una habitación de... digamos 10x10x2,5 metros con uno de estos funcionando te podría asfixiar completamente en ¡menos de 2 segundos!).

c es la cantidad de combustible vertido en la “corriente” de gases dentro del motor, también en kilogramos por segundo; en un motor más o menos moderno c viene siendo el 2 % del valor de G. v_s es la velocidad de salida de los gases, y v_0 es la velocidad a la que los gases entran al motor.

En la definición de empuje; por otra parte; mencionamos que el motor era una caja que recibía gases a una velocidad v_0 , nótese que es exactamente lo mismo que el aire esté quieto y el motor sea lanzado contra el aire a una velocidad v_0 que que sea el motor el que esté quieto y los gases lo ataquen a velocidad v_0 . De hecho, si atásemos un capitalista al pilón de nuestra grulla y volásemos sobre las nubes de forma que no tuviera referencia alguna; juraría y juraría que es el aire quien le golpea a él y no al revés (de ahí el follón que hubo en el s.XV acerca de si era la tierra la que giraba alrededor del sol o a la inversa)

Examinemos ahora esta expresión tan simple y tan inofensiva en apariencia. Recordemos que nos movemos en un medio (el aire) que ofrece resistencia a ser penetrado (¿uh?) de manera proporcional a la velocidad con la que nos movemos en él. Esto viene a decir, que estado quietos, el aire no ofrece resistencia alguna, pero que si empezamos a rodar por pista a 100 km/h el aire ejercerá una determinada fuerza sobre nosotros, cuando pasemos a volar a 200km/h, la fuerza será ¡4 veces mayor!

Por lo que, vemos que cuanto mayor velocidad de vuelo, mayor es la resistencia que ofrece el aire. Pero también observamos que, en primera aproximación y para gasto constante, ¡El empuje disminuye con la velocidad de vuelo!³

Así pues, si la resistencia al avance aumenta con la velocidad, y la fuerza de que disponemos para vencerlo disminuye cuanto más alta es ésta nos encontramos con que a una determinada velocidad de vuelo, la resistencia y el empuje se anulan entre sí, y puesto que la variación de cantidad de movimiento se anula para este caso, pasamos a movernos con velocidad constante.

³Debo hacer notar, que en un vuelo real, el gasto que un motor ingiere no es ni mucho menos constante, y de hecho, cuanto más rápido se mueve el avión, más aire ingiere el motor por unidad de tiempo. Sin embargo, el incremento de gasto con la velocidad no es el suficiente, y de hecho, normalmente, tras un pequeño intervalo de velocidades en el que el empuje realmente aumenta; el empuje del motor decrece hasta hacerse nulo.

No podemos seguir acelerando. Hemos llegado a una velocidad techo marcada por el motor y si queremos sobrepasar esta velocidad tenemos que cambiar el motor (o cambiar la configuración aerodinámica del avión para que la resistencia sea menor)

4. La eficiencia.

Para empezar, debemos clarificar un par de términos:

- Motor: parte de un sistema que se encarga en la transformación de alguna forma de energía en otra
- Propulsor: La parte del sistema que traduce la energía en propulsión efectiva.

Tal vez sea adecuado para comprender estos dos conceptos aplicándolos al mundo del automóvil.

En un coche el motor sería lo que todos conocemos como tal, ese maquinón extraño que se aloja bajo el capot, y el propulsor serían las ruedas, el agente que traduce la energía conseguida por el motor en propulsión efectiva. Ambos elementos operando al unísono son lo que se conoce como “grupo motopropulsor”

Ahora bien, las leyes de la termodinámica son ineludible, así que para obtener algo, tenemos que invertir de más. Para expresar esta idea se definen unas magnitudes conocidas como rendimientos. Tanto el motor como la parte propulsora tienen rendimientos propios. De manera totalmente general, un rendimiento (normalmente etiquetados con la letra griega eta, η) es:

$$\eta = \frac{\text{lo que obtengo}}{\text{lo que entrego}}$$

Se puede demostrar (por favor, fiaros de mí) que el rendimiento de un chorro de gas como propulsor es:

$$\eta_{prop} = \frac{2v_0}{v_s + v_0}$$

En donde v_0 es la velocidad de entrada al motor y v_s la velocidad a la que los gases abandonan el motor. (Todas estas velocidades se refieren al motor)

y el rendimiento de un motor es:

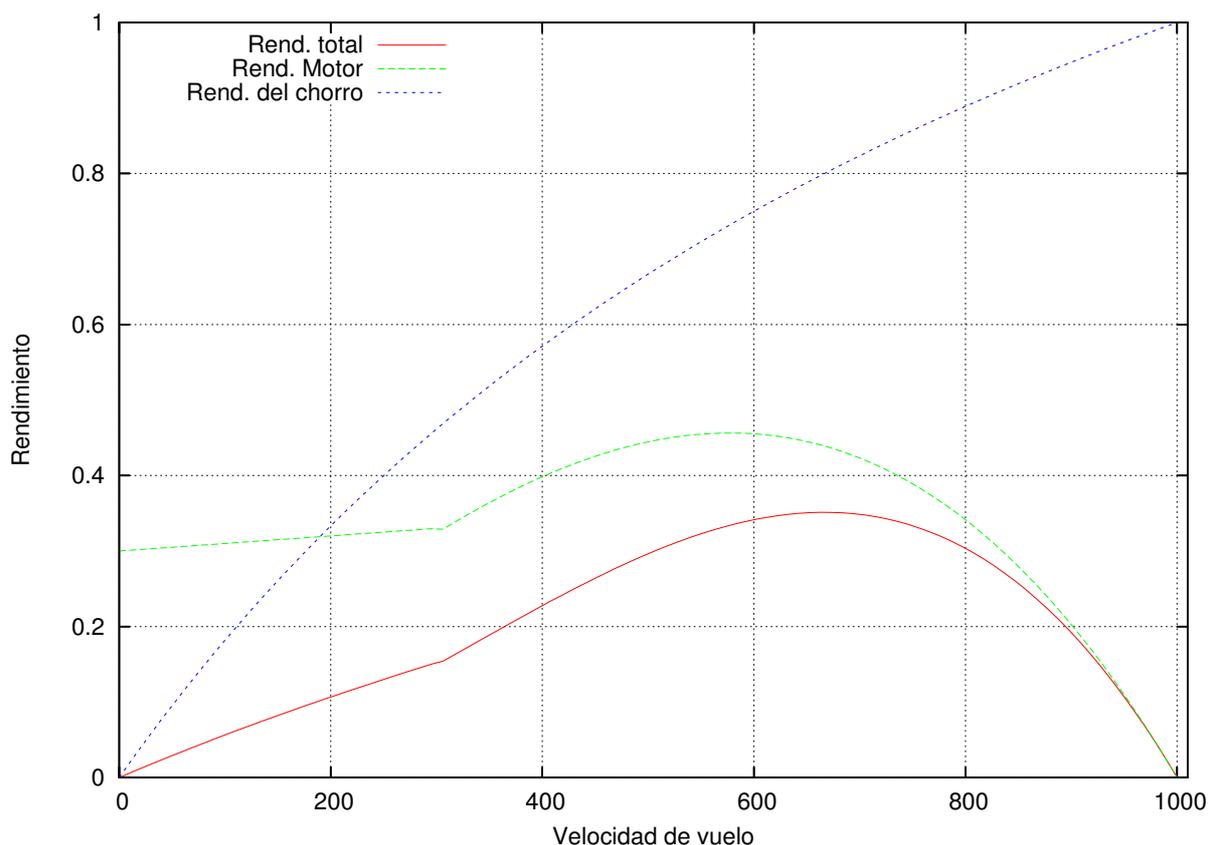
$$\eta_{motor} = \frac{\frac{1}{2}G(v_s^2 - v_0^2)}{cL}$$

En esta fórmula aparece un nuevo parámetro conocido, la L representa el poder calorífico de nuestro combustible (es una característica del combustible usado)

Y se puede expresar el rendimiento total del sistema se puede expresar por:

$$\eta_{total} = \eta_{prop}\eta_{motor}$$

La siguiente gráfica ilustra muy bien la dependencia de los rendimientos de las partes de un motor con respecto a la velocidad de vuelo, pero por favor, fijaos más bien, en la forma más que en valores numéricos. (Lo he hecho lo mejor que he podido, lo cierto es que dibujado a mano queda mejor)



Podemos ver claramente en esta gráfica, como este motor ha sido optimizado para volar en torno a los 600-700 Km/h obteniendo en estas velocidades el mejor rendimiento global. Es decir, este avión debería tratar de volar en todo momento a esas velocidades para poder minimizar el consumo inútil de combustible.

Vemos también, como por encima y por debajo de estas velocidades de diseño, el sistema aprovecha **peor** energía

5. Diferentes necesidades, diferentes motores.

La gráfica que hemos visto antes mostraba como depende el rendimiento total del grupo motopropulsor con respecto a la velocidad de vuelo, y vimos como la velocidad ideal de vuelo serían unos 600 o 700 Km/h, pero ¿Qué pasa si yo quiero volar más despacio que eso? ¿Debo tragar con un grupo motopropulsor que despilfarra energía?

No necesariamente, podemos ver que el chorro tiene una buena eficiencia para velocidades de vuelo altas, pero, podemos sustituir el chorro por una hélice y obtener un perfil de rendimientos diferentes para obtener ¡un turbohélice!

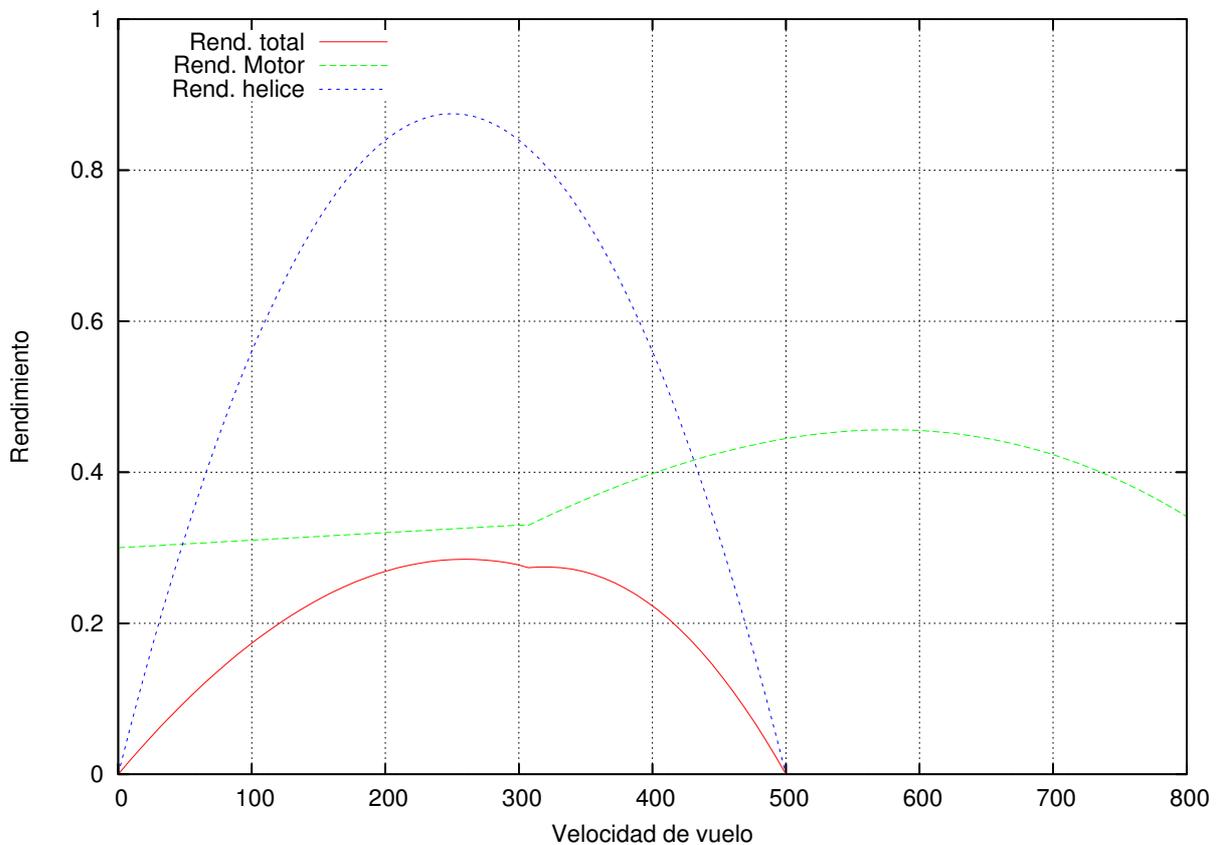
Ojo, este artículo se refiere sólo a motores de combustión continua; no debemos confundir un turbohélice con los motores alternativos que llevan la mayoría de aeronaves de aviación general.

Puntualicemos. Hasta ahora, hemos sido muy genéricos y hemos hablado del grupo motopropulsor como una “caja negra” en la que metemos algo, aplicamos energía y sacamos otra cosa+ movimiento.

Los componentes de esta caja negra se describirán en otro artículo (si es que este recibe el aprobado) pero puedo adelantar algo:

- Tenemos un compresor, una cámara de combustión y una turbina
- Tras inyectar energía al aire con el combustible, obtenemos energía en la **turbina** para poder mover el **compresor**, el resto; lo vertimos hacia el exterior formando el chorro propulsivo, que nos da empuje
- Existe otro enfoque, en lugar de coger de la corriente la energía necesaria para mover el compresor, cogemos casi toda la energía y destinamos una parte a mover un compresor, y la inmensa mayoría, a mover una hélice.
- Este último concepto es el turbohélice.

Bien, aclarado el concepto básico de turbohélice (prometo ahondar más en la próxima parte) cabe preguntarse, ¿Por qué hacer eso? Simple, el perfil de rendimientos de una hélice es diferente al de un chorro. Este gráfico debería mostrar la diferencia:



Podemos ver como el perfil completamente diferente de rendimientos de la hélice nos permite volar de manera eficiente en rangos de velocidad de los 200 a 400 km/h (con el mismo motor), pero; observemos también como esto es un arma de doble filo, pues nos **impide** volar a más de 500 km/h

Este es el motivo por el cual los grandes aviones de línea llevan turbojets o turbofans y porqué los aviones de línea regionales llevan turbohélice. Están optimizados para rangos de velocidad muy diferentes, por eso su elección del propulsor es diferente.

6. Turbofan y Turbojet.

Muchas veces uno escucha los palabros estos y no sabe de qué va el tema. En realidad, el asunto es bastante fácil, y si bien estaría mejor colocado en la segunda parte de este artículo (en donde se detallan los componentes íntimos del motor) no me puedo resistir a dar por cerrado este artículo sin explicar este pequeño asunto.

Bien, antes hemos hablado del chorro de propulsión y de su rendimiento cuya fórmula viene a ser:

$$\eta_{prop} = \frac{2v_0}{v_s + v_0}$$

Hay un parámetro en esta fórmula que podemos modificar a la hora de diseñar un motor, es la salida de escape de los gases.

El incremento de velocidad de los gases a la salida tiene que ver con que al salir del motor, se encuentran con más energía que con la que entraron; energía que les proporcionamos al hacerlos pasar por una **cámara de combustión**.

A alguien (realmente no conozco el artífice de la idea) se le ocurrió la genial idea de que no necesitamos que todos los gases pasen por esa cámara de combustión. Simplemente comprimiendo un gas y expandiéndolo luego de la forma adecuada podemos obtener empuje.

Así pues, en un turbofan, todo el aire que entra en el sistema pasa por un primer compresor muy grande y que gira relativamente lento (el fan; o ventilador) pero sólo una parte del gas se lleva a la cámara de combustión. Con esto, obtenemos dos corrientes de aire diferenciadas (por esto, a estos motores se les denomina también, de doble flujo) una con una velocidad de salida más bien baja (el aire que sólo ha pasado por el fan, el flujo secundario) y una con una velocidad de salida equivalente a la de un turbojet (estos son los motores en los que todo el aire pasa por la cámara de combustión) por lo que, en media, la velocidad de salida de los gases **ha bajado**. De esta manera podemos incrementar la eficiencia del motor.

Y de hecho, la presencia del primer “gran” ventilador incrementa mucho el gasto de aire que el motor ingesta, con lo que, en determinados motores, no sólo incrementamos la eficiencia, si no que también aumentamos el empuje neto disponible.

Es por estas ventajas que la mayoría de motores con propulsión a chorro que hoy se equipan son turbofans, quedando ya los turbojets relegados en los setenta u ochentas.