



Consideraciones teóricas sobre el motor de reacción

Publicamos a continuación una breve síntesis de los artículos del Dr. Stemmer aparecidos en la revista suiza "Flugwehr und Technik", números 7 y 8 del año 1941, recopilados por el Capitán Domínguez.

GENERALIDADES

EL conocido principio físico de equivalencia entre la acción y la reacción constituye, como es sabido, el substratum físico-matemático sobre el que se asienta toda la teoría de los motores de impulsión por reacción, cuyo desarrollo buscan ávidamente las naciones en su deseo de conseguir la supremacía aérea y de dominar cada día mayores espacios.

Este principio, intuído por los hombres desde la más remota antigüedad, no había sido valorado en toda su importancia hasta hace muy poco tiempo, y sus consecuencias han permitido al hombre concebir nuevas esperanzas para la realización de uno de sus más apasionantes deseos: la navegación interplanetaria.

Desde el punto de vista aeronáutico, el interés histórico de los distintos mecanismos fundados en este principio, puede decirse que marcha paralelamente con el del desarrollo de los llamados "cohetes", móviles de impulsión por reacción, empleados con muy variados fines desde los tiempos de esplendor del Lejano Oriente. Se atribuye, en efecto, a los chinos la concepción, desarrollo y empleo de los proyectiles-cohetes con fines bélicos. Algunos pueblos de la Edad antigua conocieron y emplearon tales proyectiles, si bien con una técnica muy inferior a la que ya había sido empleada hacia mil años por el imperio de los Han. Con escasos progresos en esta materia, llegamos a la Edad moderna, en que de nuevo los proyectiles-cohetes adquirieron especial importancia. Por no citar más que algunos ejemplos, diré que la guerra de los treinta años marca un período de intenso empleo del cohete como arma destructora, y la Europa napoleónica lo desarrolla y emplea tan eficazmente, que las caídas de Bculogne (1806) y Copenhague (1807) se deben en gran parte al intenso bombardeo experimentado con proyectiles-cohetes, realizado por las huestes del general Congrève, y que alcanzaron en la última ciudad el número, bien significativo, de 120.000.

Aunque la precisión y alcance de este arma eran muy reducidos, podían, no obstante, parangonarse con los obtenidos en aquellos tiempos por la artillería de tubo liso, a la que, en cambio, aventajaban en economía y manejabilidad. Al aparecer pocos años después la artillería rayada, con un notable aumento en la precisión del tiro, en el alcance y una mayor estabilización del proyectil en su trayectoria, el cohete pierde interés y va relegándosele día tras día, hasta terminar por desaparecer del campo de batalla para ser empleado con otros fines, como el lanzamiento de señales, salvamento de barcos, etc., etc. Esta época, que aparentemente parece marcar el abandono del sistema de impulsión "cohete", corresponde, por el contrario, al comienzo del período de estudio y experimentación científicos del efecto reactivo de los cohetes y sus posibilidades desde el punto de vista de la física moderna.

Las naciones más aventajadas técnicamente comienzan a entrever las interesantes consecuencias prácticas que del desarrollo de este nuevo sistema de impulsión pueden derivarse, dando principio así a una serie de experimentos teórico-prácticos para el desarrollo del mismo. Puede situarse este período para la mayor parte de las naciones que reconocieron desde el principio las posibilidades del "cohete", entre los años 1915-1920. Veamos cuáles son estas posibilidades en un ligero análisis teórico del fundamento de este sistema de impulsión.

PRINCIPIO DE LA ACCION Y REACCION.— CONSECUENCIAS DE SU APLICACION AL CASO DE LA IMPULSION POR REACCION

En su forma más simplista puede enunciarse el principio diciendo que "a toda acción se opone una reacción de igual magnitud y sentido contrario", o también, que "todo cuerpo

que efectúa una acción determinada en un medio cualquiera, experimenta por parte de éste una reacción de igual magnitud”.

Este principio se hace ostensible claramente en numerosos ejemplos de la vida corriente, a que no es necesario referirnos para poner de manifiesto su realidad. Sin embargo, acostumbrados a considerar corrientemente fuerzas exteriores al sistema que experimenta la “acción”, no podemos concebir la inmediata relación establecida por el principio anterior y el movimiento de los proyectiles-cohetes, o de un objeto cualquiera movido por reacción, ya que en estos casos intervienen fuerzas producidas dentro del propio sistema móvil; no obstante, la equivalencia que establece el principio subsiste en toda su integridad.

Hagamos observar, por otra parte, que una vez originada la acción, la “reacción” aparecerá (según establece el principio) independientemente de cualesquiera otros factores no relacionados directamente con el origen de aquélla, y por tanto, que será posible impulsar por este procedimiento a un móvil a través de cualquier espacio si conseguimos crear la acción o esfuerzo inicial. He aquí, por consiguiente, cómo este nuevo sistema de propulsión ofrece la posibilidad de surcar los espacios estratosféricos e interplanetarios.

Ahora bien: si la creación del impulso inicial (acción) la hacemos depender de otros factores ajenos al sistema móvil, habremos condicionado ya en cierto modo nuestro movimiento; este es el caso de los motores de reacción que utilizan para la propulsión combustible líquido mezclado con aire comprimido tomado del exterior, pues su movimiento está condicionado por la posibilidad de tomar el aire del medio ambiente, lo cual limita evidentemente su zona de movimiento a aquellas capas atmosféricas donde sea posible lograr la necesaria compresión para el funcionamiento del motor, y, si es posible que alcancen algunas zonas superiores, será solamente a consecuencia de la energía cinética adquirida durante el funcionamiento del motor en las capas inferiores.

Lo mismo que decimos de este sistema móvil *ligado*, podemos hacerlo extensivo a todos aquellos sistemas en que, como decíamos más arriba, la creación del impulso inicial esté condicionada en cualquier modo o sentido.

Es claro que desde el punto de vista de la navegación, los sistemas *no ligados* ofrecen las máximas posibilidades; este es el caso, por ejemplo, del cohete, o también de cualquier móvil que lleve en su interior todos los elementos indispensables para la creación del impulso activo.

PRINCIPIO DE LAS CANTIDADES DE MOVIMIENTO. CONDICIONES FUNCIONALES Y CONSTRUCTIVAS DEL MOTOR

Consecuencia inmediata de la igualdad entre la acción y la reacción es, según se sabe, la ley de Newton referente a las cantidades de movimiento adquiridas por las masas que experimentan los respectivos esfuerzos (acción y reacción). Llamando M y m a estas masas (que en el caso

de impulsión por reacción corresponden evidentemente a la masa del sistema móvil y a la de la carga proyectada en un instante determinado), la ley anterior expresa que

$$Mv = mV,$$

fórmula en la que v y V representan las velocidades respectivas de las masas en movimiento.

En el caso de los móviles de reacción, la velocidad de la carga de proyección representa una constante dependiente de la naturaleza de aquella carga, de la relación de compresión, características de la tobera, etc., la designaremos en lo sucesivo por c ; por consiguiente, la igualdad de las cantidades de movimiento puede escribirse, para un instante infinitesimal de tiempo, en esta otra forma:

$$M \cdot dv = - c dm,$$

que corresponde a la ecuación finita escrita arriba.

Esta ecuación expresa la posibilidad de alcanzar una velocidad cualquiera para nuestro sistema móvil, sin más que lograr las convenientes velocidades de escape c y una adecuada división de masas; sin embargo, el logro de esta velocidad está limitado por la posibilidad de almacenar una gran cantidad de masas para nuestro sistema móvil, además de que esta división de masas finita acabaría rápidamente con la masa total del sistema.

A estas limitaciones que se presentan al tratar de aplicar el sistema de impulsión por reacción a un objeto inanimado, vienen a sumarse otras específicas de los sistemas móviles tripulados, como en el caso de la navegación aérea. En efecto, la propia constitución fisiológica del organismo humano impide sobrepasar la aceleración instantánea de 30 metros/seg². Así, pues, el sistema de reacción por proyección sucesiva de partes alícuotas de masa del sistema móvil, presentará serios inconvenientes en su aplicación a la navegación aérea.

PROBLEMA MATEMATICO DE LA IMPULSION POR REACCION

Ciñéndonos ya exclusivamente al problema matemático que plantea este sistema de impulsión, y teniendo en cuenta que si admitimos una división de masas igual a

$$M/m = n,$$

al cabo de k proyecciones de enésimas partes de la masa residual, el principio de las cantidades de movimientos establece que

$$M_t \cdot v = (M_t/n) c \cdot k,$$

o lo que es lo mismo,

$$v = (c/n) k,$$

esta relación hace depender la obtención de una velocidad final cualquiera para la masa restante del sistema móvil,

de la conveniente subdivisión de la masa y del número k de proyecciones de partículas de masa M/n . Así, si queremos alcanzar la velocidad final de 50 kms/seg., siendo la velocidad de proyección $c = 2.500$ metros/segundo y 50 el número de divisiones, habríamos de provocar:

$$k = (n/c) v = (50/2.500) \cdot 50.000 = 1.000 \text{ impulsos.}$$

Ahora bien: comoquiera que la reducción de masa inicia podemos hacerla tan elevada como queramos (teóricamente hasta la división del átomo), habremos de compensar la consecuente disminución de velocidad experimentada por nuestro sistema móvil, aumentando simultáneamente el número de eyecciones de masa m a la velocidad c ; y así tenemos, por ejemplo, que para lograr los 3.600 kilómetros/hora con una velocidad de escape $c = 2.500$ metros/segundo y una división de masas $M/m = 1.000$, bastará efectuar

$$k = (3.600.000/3.600 \cdot 2.500) \times 1.000 = 400 \text{ proyecciones por segundo.}$$

La aceleración de nuestro móvil, siendo k el número de impulsos realizados en el tiempo t , viene dada por la fórmula

$$\gamma = \frac{1}{n} c \frac{k}{t} = \frac{c}{n} f,$$

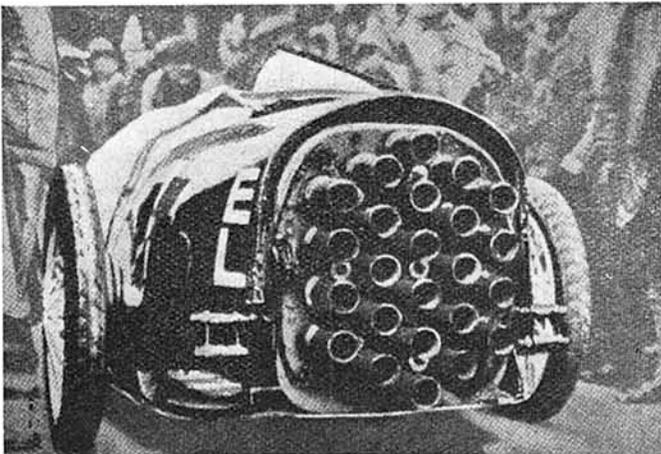
siendo f la frecuencia de los mismos.

De la ecuación fundamental, que expresa la igualdad de los impulsos en su forma diferencial, obtenemos asimismo la velocidad alcanzada por el móvil al cabo del tiempo t sin más que integrarla entre o y t , lo cual da:

$$\int_0^t m_t dv = - \int_0^t c dm_p \quad \therefore \quad \frac{1}{c} \int_0^t dv = - \int_0^t \frac{dm_p}{m_t};$$

pero en un instante dado es:

$$m_t = m_{pt} + m_r;$$



Automóvil de propulsión por reacción construido por Von Oppel y Max Valier; se emplearon 24 cohetes de pólvora Sauder, de una longitud de 80 centímetros.

luego

$$\frac{1}{c} [v]_0^t = - \int_0^t \frac{dm_p}{m_{pt} + m_r} = - [l(m_p + m_r)]_0^t,$$

o sea:

$$v_t = c l \frac{m_p + m_r}{m_{pt} + m_r},$$

que a su vez permite determinar la velocidad máxima obtenible, y que, como puede verse, corresponde al final del período de trabajo, es decir, cuando ha sido proyectada toda la masa activa, pues entonces es $m_{pt} = 0$, y tendremos:

$$v_{max} = c l \frac{m_p + m_r}{m_r} = c l \left(1 + \frac{m_p}{m_r} \right).$$

¿A qué ha quedado reducido nuestro sistema móvil con esta división de masas? Evidentemente, si la masa inicial del sistema es M , al final de la primera eyección será:

$$M_1 = M - M/n = (n - 1/n) M;$$

al final de la segunda eyección será:

$$M_2 = M_1 - M_1/n = (n - 1/n)^2 M,$$

y así sucesivamente, al cabo de k eyecciones, la masa restante del sistema será:

$$M_k = (n - 1/n)^k M.$$

Esta fórmula permite investigar las mejores condiciones de división de masas para valores dados de k y n . Fijadas la velocidad final a adquirir por el sistema móvil, la velocidad de proyección c y la frecuencia de las mismas, es evidente que las mejores condiciones de realización las cumple el sistema de división infinitesimal de la masa, ya que para $n \rightarrow \infty$ el valor de la expresión $(n-1/n)^k M$ es máximo, pues

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} M \left(\frac{n-1}{n} \right)^k &= M \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{\frac{\gamma n}{c}} = M \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(\frac{n-1}{n} \right)^n \right]^{\frac{\gamma}{c}} = \\ &= M \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\left(1 - \frac{1}{n} \right)^n \right]^{\frac{\gamma}{c}} = M e^{-\frac{\gamma}{c}} = M e^{-\frac{v}{c}}; \end{aligned}$$

lo cual permite disponer del máximo peso para carga útil en nuestro sistema móvil.

En cuanto a la frecuencia de las proyecciones, habremos de tener presente la restricción que supone la aceleración máxima tolerada por el organismo humano, y que puede fijarse, aproximadamente, alrededor de los 30 m/seg.² durante escasos segundos. Por tanto, y comoquiera que la aceleración experimentada por nuestro sistema móvil es, según vimos arriba,

$$\gamma = \frac{c}{n} \cdot f,$$

habremos de fijar la frecuencia f de las proyecciones según los valores correspondientes de n y c ; así, por ejem-

plo, para lograr la velocidad de 3.600 kms/h., fijando el valor de c en 2.500 m/seg. y n en 1.000, tendríamos para $f = \gamma (n/c) = 30.1000/2.500 = 12$ proyecciones por segundo, límite máximo para hacer soportable al organismo humano el movimiento del sistema durante escasos segundos.

Por otra parte, esta forma de producir los impulsos resulta poco adecuada para la propulsión de un sistema móvil tripulado, además de exigir al sistema especiales características técnico-constructivas y materiales de elevada resistencia para soportar los efectos de estos esfuerzos discontinuos, por lo cual se hace conveniente elevar la frecuencia de los mismos, reduciendo simultáneamente el valor de $1/n$, con lo que lograremos también acercarnos más al sistema de división infinitesimal de masa.

CONSECUENCIA

De cuanto queda expuesto pueden deducirse fácilmente las siguientes consecuencias teóricas:

Primera. Los sistemas de propulsión por reacción *no ligados* representan, desde el punto de vista teórico, las máximas posibilidades para la navegación aérea.

Segunda. Las materias que permitan la obtención de máximas velocidades en el escape representan las máximas posibilidades para el logro de grandes distancias y velocidades en estos móviles aéreos.

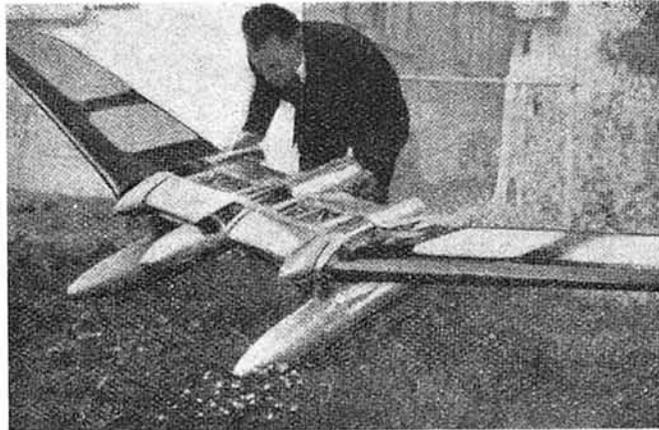
Tercera. Cuanto mayor sea la masa inicial del sistema, tanto mayores serán las velocidades y distancias adquiridas por el móvil.

Cuarta. La velocidad máxima es adquirida por el móvil al final del último período de trabajo.

Quinta. El sistema de proyección de partículas infinitesimales de materia da el máximo peso disponible para la carga del móvil aéreo.

Sexta. La proyección continua de masa activa representa las mejores condiciones de posibilidad técnico-constructiva del sistema móvil.

Modelo reducido de avión con el que se realizaron en Suiza diferentes



experimentos encaminados al desarrollo del motor de reacción.