Turborreactores

AUMENTO MOMENTANEO DEL EMPUJE MEDIANTE INYECCION DE AGUA

Por GREGORIO GOMEZ MORENO
Teniente Cadete 5.° curso de la Academia Militar
de Ingenieros Aeronáuticos.

(Segundo premio de Tema Técnico de nuestro Sexto Concurso.)

Para aumentar el empuje de los turborreactores se pueden aplicar tres métodos generales:

1.° Utilización de un sistema rotativo o a reacción.

Es simplemente un grupo auxiliar turbina-compresor. Después de salir los gases de la turbina principal, pasan a través de los álabes de la turbina del incrementador, cediendo parte de su energía utilizable. Esta turbina mueve el compresor del incrementador de empuje, que es de pequeña relación de compresión, que aspira aire de la atmósfera, imprimiéndole una cierta velocidad y saliendo por una tobera mezclado o no con los gases principales. Este sistema rotativo debe funcionar normalmente a un régimen menor que el de la turbina principal, por lo cual, caso de utilizar el mismo eje, se montará loco sobre él. Este sistema ha sido empleado en el Metropolitán-Vickers F. 2/3 (figura 1).

2.° Combustión de combustible adicional en la tobera de salida.

El quemar combustible adicional en la tobera de salida es, desde un punto de vista termodinámico, añadir un ciclo de Brayton. Este sistema tiene, de la misma forma que el siguiente, el inconveniente de aumentar el consumo específico de combustible, limitando, por tanto, su funcionamiento a breves períodos.

3.° Inyección de un líquido con gran calor latente de vaporización en el compresor o en las cámaras de combustión.

Este es el tema que vamos a desarrollar en el presente trabajo.

Dejando a un lado los dos primeros métodos, vamos a ver cómo aumenta el empuje de un turborreactor al inyectar un líquido con calor de vaporización elevado. El líquido más indicado es el agua, pudiéndose inyectar sola o bien en una mezcla binaria con alcohol etílico, y que ha de ser llevada a bordo, como el combustible. Estudiaremos únicamente el caso de inyección solo de agua.

Hay dos posibilidades para la inyección de agua:

a) Durante la compresión, con lo que se aproximaría ésta a la isoterma, lo que puede ofrecer algún interés. Presenta dificultades, e inclusive podrían dañarse los álabes del compresor, teniéndose que realizar un trabajo de compresión para el vapor.

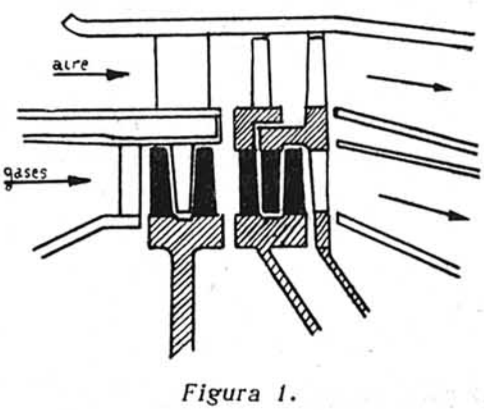

Figura 1.

b) En la cámara de combustión, inyección fácil de realizar; por lo cual estudiaremos en esta solución.

En el funcionamiento con inyección de agua conservamos la temperatura de fin de combustión

$$T_3 = T_o + \frac{V^2}{2\,g\,\mathcal{J}\,C_p^c} + \frac{\Delta\,T_c}{\eta_2},$$

y la presión $P_3 = P_2$, ya que la combustión es a presión constante.

El gasto de aire G se descompone en la cámara de combustión en el aire primario G_1, que se mezcla directamente con el combustible, para su combustión, y el aire secundario G_2, que baja la temperatura de los gases de la combustión al mezclarse con ellos antes de expansionarse en la turbina.

Por tanto,

$$G = G_1 + G_2 = G_1\left(1 + \frac{G_2}{G_1}\right) = G_1\,(1 + \alpha);$$

dividiendo por el consumo de combustible G, se tiene la relación aire/combustible

$$r = \frac{G}{C} = \frac{G_1}{C}\,(1 + \alpha),$$

y llamando a la relación aire primario/combustible

$$\theta = \frac{G_1}{C},$$

resulta

$$G = C\,\theta\,(1 + \alpha)$$

en el funcionamiento sin inyección de agua.

En el funcionamiento con inyección de agua se conservan dos cosas. El gasto G de aire y la relación aire primario/combustible, pero ésta es

$$\theta = \frac{G_1'}{C'},$$

indicando los acentos que el funcionamiento es con inyección de agua y teniendo valores distintos de G_1 y C.

Por tanto, se tiene:

$$G = C'\,\theta\,(1 + \alpha'),$$

o sea,

$$C\,(1 + \alpha) = C'\,(1 + \alpha').$$

El gasto de agua inyectada lo podemos ver en la forma: $A = C'\,\beta$, siendo β, por tanto, la relación agua/combustible.

El gasto total de gases es:

Sin inyección de agua:

$$M = C + G = C\left(1 + \theta\,(1 + \alpha)\right).$$

Con inyección de agua:

$$M' = C' + G + A = C'\left(1 + \theta\,(1 + \alpha') + \beta\right).$$

Admitimos que el rendimiento de la combustión η_q no se modifica. Para conservar T_3 cambia la composición de los gases, ya que la vaporización del agua inyectada contrarresta la reducción del exceso relativo de aire al pasar α a α' y ser α' más pequeña que α.

Por el primer principio se establece que:

$$\alpha' = \alpha - \beta\,\frac{H_3' - H_2'}{\theta\,(H_3 - H_2)}; \qquad [1]$$

donde H designa la entalpía específica del aire en exceso y H' la del vapor de agua. En esta expresión H_2' se refiere al agua inyectada a temperatura de 288 grados K y presión P_2, mientras que H_3' se refiere al vapor supercalentado a $P_3 = P_2$ y a T_3.

Para los turborreactores ordinarios del momento actual, y para un cálculo aproximado se puede tomar, en vez de la fórmula [1], la siguiente fórmula

$$\alpha' \simeq \alpha - \frac{\beta}{\theta}\left[1{,}9 + \frac{1\,900 + 1{,}1\,T_2}{T_3 - T_2}\right]. \qquad [2]$$

En esta fórmula el paréntesis, para dichos turborreactores y combustibles usuales, toma valores del orden de 5.

La relación de inyección β la sustituímos por el coeficiente adimensional.

$$\varphi = \frac{\beta}{\theta\,(1 + \alpha)}\,\frac{H_3' - H_2'}{H_3 - H_2} = \frac{\beta\,n}{\theta\,(1 + \alpha)};$$

siendo

$$n = \frac{H_3' - H_2'}{H_3 - H_2},$$

que se puede calcular a partir de β, T_2 y T_3, que sustituyendo en [1], resulta:

$$\alpha' = \alpha - \varphi\,(1 + \alpha) \qquad [3]$$

con lo que la relación de gastos se transforma en:

$$\frac{M'}{M} = \frac{C'\left[1+\theta(1+\alpha')+\beta\right]}{C\left[1+\theta(1+\alpha)\right]} =$$

$$= \frac{C'+C'\left[\theta(1+\alpha')+\beta\right]}{C+C\theta(1+\alpha)} \approx \frac{C'\left[\theta(1+\alpha')+\beta\right]}{C\theta(1+\alpha)};$$

y haciendo operaciones se transforma en:

$$\frac{M'}{M} \approx 1 + \frac{\varphi}{n(1-\varphi)} \qquad [4]$$

Si representamos las ecuaciones [3] y [4] (ver fig. 2), se tiene una recta para [3] y una hipérbola equilátera para [4].

Indudablemente, el exceso relativo α' debe ser positivo, lo que da como límite superior para φ:

$$\varphi_o = \frac{\alpha}{1+\alpha}$$

cuando $\alpha' = 0$.

Es evidente que, so pena de refrigerar demasiado la llama, e inclusive llegar a su apagamiento, si inyectamos demasiada agua

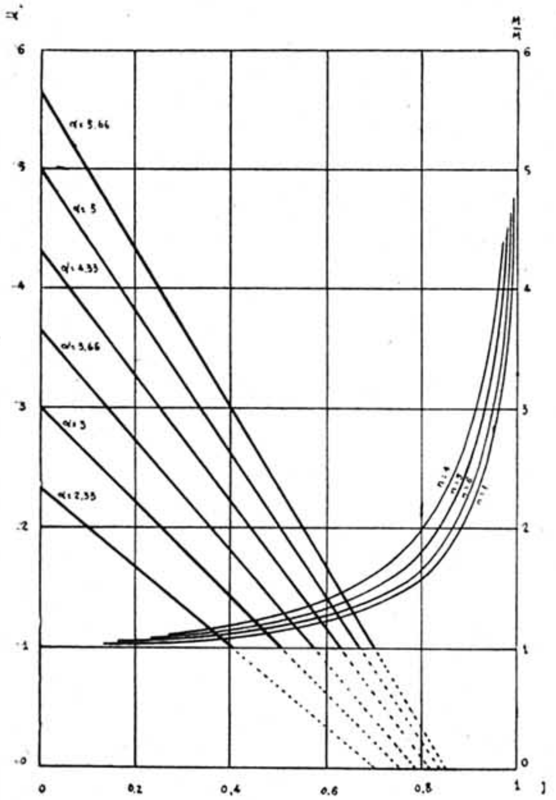

Figura 2.

pulverizada en la cámara de combustión, es preciso limitar a un cierto valor mínimo positivo, que admitamos sea $\alpha' = 1$. Aun cuando se admita este valor, habría que comprobar experimentalmente en cada tipo de cámara el valor mínimo admisible para α', que posiblemente tendría que ser mayor que el valor 1 que hemos tomado.

Con este valor $\alpha' = 1$, resulta como verdadero máximo alcanzable para φ,

$$\varphi_1 = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}.$$

Como

$$\alpha = \frac{G_2}{G_1} = \frac{G - G_1}{G_1} = \frac{r}{\theta} - 1,$$

se tiene:

$$\varphi_1 = 1 - \frac{2\theta}{r},$$

aumentando φ_1 y, por tanto, $\frac{M'}{M}$ —con lo que aumenta el empuje— al aumentar r. Los valores más corrientes son de 15 a 18 para θ, y r oscila alrededor de 60.

Veamos la influencia que ejerce la inyección de agua en un turborreactor cuyas características principales son:

Relación aire total/combustible: $r = 60$.

Gasto de aire: $G = 31{,}2$ kg/seg.

Incremento de temperatura teórico en el compresor: 168° C.

Tomando para la relación aire primario/combustible $\theta = 15$, resulta:

$$\alpha = \frac{G}{C\theta} - 1 = \frac{31{,}2}{0{,}52 \times 15} - 1 = 3,$$

que para $\alpha' = 0$ da:

$$I_o = \frac{\alpha}{1+\alpha} = \frac{3}{4} = 0{,}75;$$

y admitiendo el límite para $\alpha' = 1$, se tiene:

$$I_1 = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} = \frac{2}{4} = 0{,}5.$$

Del estudio termodinámico del ciclo, teniendo en cuenta los distintos rendimientos, resulta:

$$T_2 = 484^\circ\, K,$$
$$T_3 = 1.104^\circ\, K.$$

Estos valores, llevados a la fórmula [2], nos permiten obtener:

$$\beta \simeq \frac{(\alpha - \alpha')\,\theta}{1{,}9 + \dfrac{1.900 + 1{,}1\,T_2}{T_3 - T_2}} =$$

$$= \frac{2 \times 15}{1{,}9 + \dfrac{1.900 + 1{,}1 \times 484}{1.104 - 484}} =$$

$$= 5{,}17 \text{ kgs. agua/kg. combustible,}$$

que es la relación de inyección agua/combustible. De aquí podemos apreciar ya la gran cantidad de agua que hay que inyectar por kilogramo de combustible, y teniendo en consideración que el consumo de combustible es bastante elevado, vemos que su funcionamiento ha de quedar limitado a breves períodos. Más adelante haremos un pequeño estudio sobre tiempos de funcionamiento.

Veamos ahora de qué forma afecta la inyección de agua al consumo de combustible. El consumo de combustible se hace, según hemos indicado anteriormente, el siguiente valor:

$$C' = \frac{C\,(1 + \alpha)}{(1 + \alpha')} = 0{,}52 \times 2 = 1{,}04 \text{ kgs. combustible/seg.,}$$

lo que supone duplicar el consumo de combustible, que, aplicado a un tipo de avión con una capacidad determinada de los depósitos de combustible, representa una disminución del tiempo posible de vuelo.

De la expresión

$$\varphi = \frac{\beta}{\theta\,(1 + \alpha)}\;\frac{H_3' - H_2'}{H_3 - H_2} = \frac{\beta\, n}{\theta\,(1 + \alpha)}$$

obtenemos:

$$n = \frac{H_3' - H_2'}{H_3 - H_2} \simeq \frac{\varphi_1\,\theta\,(1 + \alpha)}{\beta} = \frac{0{,}5 \times 15 \times 4}{5{,}17} = 5{,}8;$$

que llevado a [4], se tiene:

$$\frac{M'}{M} = 1 + \frac{\varphi_1}{n\,(1 - \varphi_1)} = 1 + \frac{0{,}5}{5{,}8 \times 0{,}5} = 1{,}17;$$

o sea, que tenemos una mejora del 17 por ciento en el gasto de gases.

La introducción de agua en la cámara de combustión produce una variación en la mezcla de gases, lo que lleva consigo una variación de la constante R' de estos gases y de su calor específico a presión constante c'_p respecto a los que había sin inyección.

Los nuevos valores son, expresados en caloría por kilogramo y por grado centígrado:

$$R' = R\,\frac{n\,(1 - \varphi_1)}{n - (n - 1)\,\varphi_1} + 0{,}11\,\frac{\varphi_1}{n},$$

$$C_p' = C_p\,\frac{n\,(1 - \varphi_1)}{n - (n - 1)\,\varphi_1} + C'_{p\,\text{vapor}}\,\frac{\varphi_1}{n};$$

que para $R = 0{,}0685$, y $c_p = 0{,}276$, y con los valores hallados resulta:

$$R' = 0{,}0685\,\frac{5{,}8 \times 0{,}5}{5{,}8 - 4{,}8 \times 0{,}5} + 0{,}11\,\frac{0{,}5}{5{,}8} = 0{,}068;$$

$$C_p' = 0{,}276\,\frac{5{,}8 \times 0{,}5}{5{,}8 - 4{,}8 \times 0{,}5} + 0{,}48\,\frac{0{,}5}{5{,}8} = 0{,}279;$$

$$r' = \frac{C_p'}{C_p' - R'} = \frac{0{,}279}{0{,}279 - 0{,}068} = 1{,}324.$$

Con estos valores estudiaremos su influencia en el resto del ciclo, resultando:

Temperatura a la salida de la turbina:

$$T_4 = T_3 - \frac{r}{r + 1}\;\frac{C_p^c}{C_p'}\;\frac{T_2 - T_1}{\eta_m} = 932{,}5^\circ \text{ k.}$$

y si suponemos que la variación de los rendimientos de la turbina y tobera de salida, η_3 y η_4, es pequeña, tenemos:

Presión a la salida de turbina:

$$P_4 = P_3\left(1 - \frac{T_3 - T_4}{T_3\,\eta_3}\right)^{\frac{\gamma'}{\gamma' - 1}} = 2{,}3 \text{ kg/cm}^2;$$

Temperatura a la salida de la tobera:

$$T_5 = T_4\left[1 - \eta_4\left(1 - \left(\frac{P_0}{P_4}\right)^{\frac{\gamma' - 1}{\gamma'}}\right)\right] = 742^\circ \text{ k.;}$$

lo que da para la velocidad de salida de los gases de escape:

$$\omega_a = \sqrt{2\,g\,\mathcal{J}\,C_p'\,(T_4 - T_5)} = 668 \text{ m/seg.,}$$

valor que es prácticamente igual al que se tiene sin inyección de agua.

Todos estos valores numéricos que hemos hallado corresponden al ciclo en condiciones estáticas al nivel del mar, o sea: a $V = 0$ m/seg., y $a = 0$ m.

En estas mismas condiciones, el empuje con inyección de agua es:

$$E_a = \frac{M'}{g}\,\omega_a = \frac{1{,}17 \times 31{,}72}{9{,}8} \times 668 = 2\,530 \text{ kg.,}$$

y el cociente entre éste y el empuje sin inyección es:

$$\frac{E_a}{E} = 1{,}17.$$

El empuje específico con inyección toma el valor

$$\frac{E_a}{C'} = 2.440 \text{ kg. de empuje/kg. de combustible.}$$

Vemos, pues, que en condiciones estáticas la inyección de agua conduce a las siguientes conclusiones:

1.ª Se duplica el consumo de combustible.

2.ª Aumenta la cantidad de gases un 17 por 100.

3.ª Apenas influye en el resto del ciclo (con las hipótesis hechas).

4.ª Aumenta el empuje un 17 por 100.

5.ª Disminuye el empuje específico.

De la misma forma que se ha hecho el estudio para condiciones estáticas al nivel del mar, lo podemos hacer en las distintas condiciones de vuelo variando la altura y la velocidad, llegando a los siguientes valores:

Como se ve de la tabla 1, los valores de C'_p difieren muy poco del valor $c'_p = 0{,}276$, tomado para el cálculo del ciclo real sin inyección de agua. Lo mismo sucede para γ' respecto a γ. Por lo cual, y aproximadamente, tomaremos como velocidad de salida de los gases de escape con inyección de agua ω_a, los valores que tiene para funcionamiento sin inyección de agua.

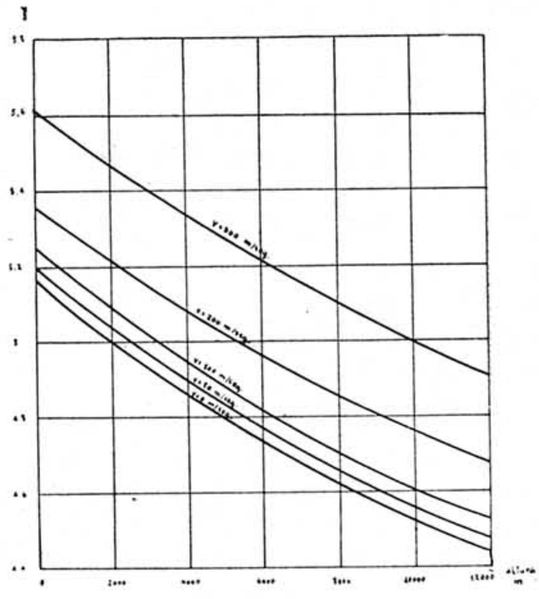

Figura 3.

Por consiguiente, se tiene para valor del empuje con inyección de agua la siguiente expresión:

$$E_a = \frac{M'}{M} \frac{G + C}{g} \omega - \frac{G}{g} V.$$

TABLA I

Altura — m.	Velocidad — m/seg.	a	I_1	ξ	n	$\frac{M'}{M}$	R'	C'_p	γ'
0	0	3,00	0,5	5,17	5,8	1,17	0,068	0,279	1,32
	100	3,05	0,505	5,24	5,85	1,173	0,068	0,278	1,322
	200	3,13	0,515	5,34	6	1,177	0 0675	0,275	1,322
	300	3,34	0,54	5,61	6,26	1,187	0,0671	0,274	1,321
4.000	100	2,87	0,484	4,95	5,66	1,165	0,0682	0,278	1,322
	200	2,97	0,496	5,1	5,8	1,17	0,0679	0,277	1,322
	300	3,15	0,518	5,36	6	1,179	0,0676	0,276	1,322
8.000	100	2,71	0,46	4,69	5,46	1,157	0,0685	0,279	1,32
	200	2,81	0,475	4,87	5,56	1,162	0,0682	0,278	1,32
	300	2,98	0,497	5,1	5,81	1,17	0,0677	0,277	1,32
12.000	100	2,6	0,445	4,53	5,35	1,15	0,0686	0,28	1,327
	200	2,7	0,46	4,67	5,46	1,156	0,0685	0,279	1,324
	300	2,85	0,48	4,9	5,66	1,163	0,0682	0,277	1,323

Obtenido este valor, se puede hallar el de la relación empuje con inyección de agua a empuje sin inyección: E_a/E.

El consumo de combustible y el empuje específico por kilogramo de combustible quedan también determinados:

$$C' = \frac{C\,(1 + \alpha)}{1 + \alpha'} \quad \text{y} \quad \frac{E_a}{C'}.$$

Los valores que toman en las distintas condiciones de vuelo están resumidos en la tabla 2:

TABLA II

Altura — m.	Velocidad — m/seg.	E_a	$\frac{E_a}{E}$	C'	$\frac{E_a}{C'}$
0	0	2.530	1,17	1,04	2.440
	100	2.313	1,192	1,08	2.140
	200	2.361	1,26	1,19	1.990
	300	2.610	1,28	1,41	1.850
4.000	100	1.663	1,19	0,725	2.300
	200	1.720	1,238	0,81	2.120
	300	1.925	1,29	0,97	1.985
8.000	100	1.135	1,17	0,47	2.420
	200	1.189	1,21	0,535	2.220
	300	1.380	1,265	0,653	2.120
12.000	100	713	1,18	0,28	2.540
	200	757	1,195	0,328	2.300
	300	928	1,28	0,41	2.260

La figura 3 muestra la variación de la relación de inyección de agua/combustible

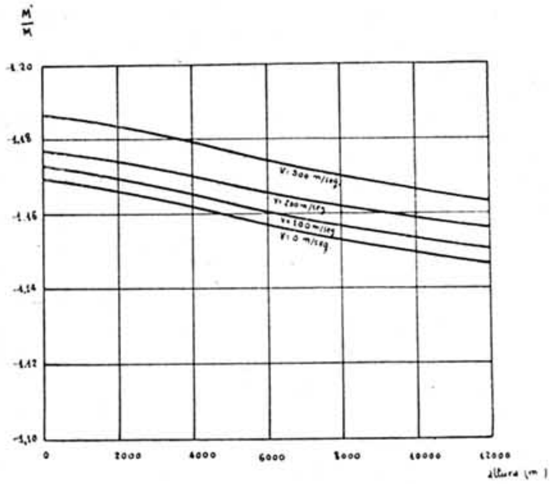

Figura 4.

con la velocidad y altura; en ella se ve que, para una misma velocidad, el valor de ξ disminuye con la altura y que para una altura constante aumenta con la velocidad. Los mayores valores de ξ se tienen volando al nivel del mar con grandes velocidades.

En la figura 4 se ha representado la variación de $\frac{M'}{M}$ en distintas condiciones de vuelo (altura y velocidad), pudiéndose apre-

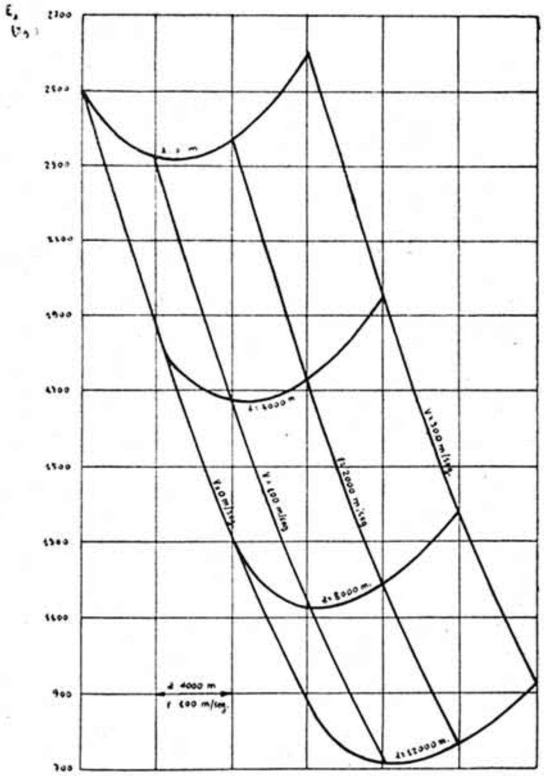

Figura 5.

ciar que esta relación varía relativamente poco entre condiciones de vuelo tan diferentes como son 200 km/h. y 12.000 metros de altura y 1.000 km/h. de velocidad al nivel del mar, que dan los valores mínimo y máximo, respectivamente.

En la figura 5 está dibujada en un diagrama de superficie la variación del empuje con inyección de agua, variando la altura y velocidad de vuelo.

La figura 6, en análogo diagrama, da la relación entre el empuje con inyección de agua y el empuje sin inyección. Si a los valores de esta relación les quitamos una

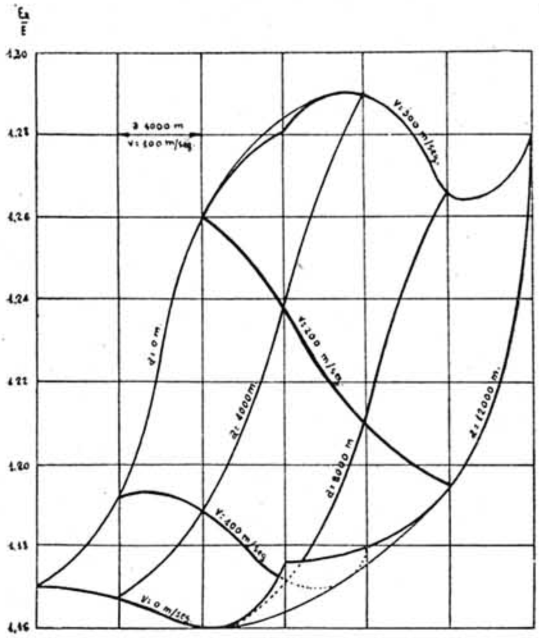

Figura 6.

unidad, se tiene el aumento de empuje por efecto de la inyección de agua.

Según la altura y velocidad en que se haga funcionar la inyección, toma valores en este turborreactor que oscilan entre el 16 y el 29 por 100.

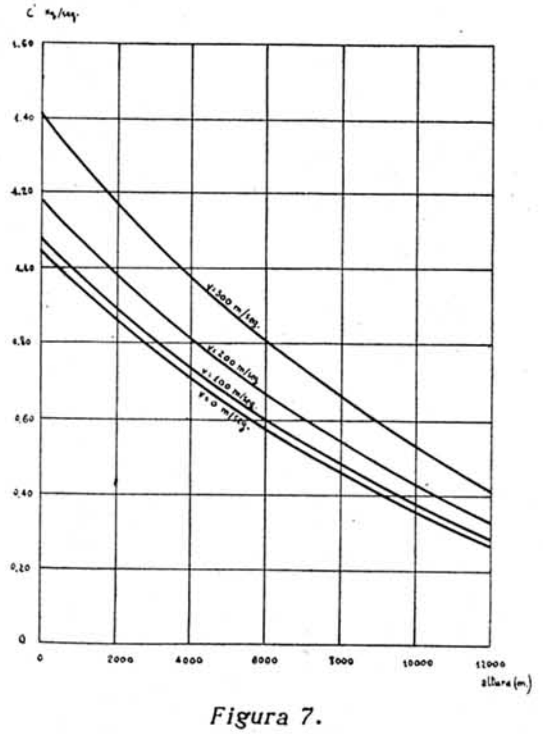

Figura 7.

La variación de C', que es análoga a la de ξ, está dibujada en la figura 7.

La variación del empuje específico por kilogramo de combustible con la velocidad y altura, está representada en la figura 8. Los valores inversos de éstos son el consumo específico por kilogramo de empuje.

Del estudio anterior se desprende que la inyección de agua es susceptible de mejorar el empuje a costa de un enorme aumento en el consumo de cuerpos activos (com-

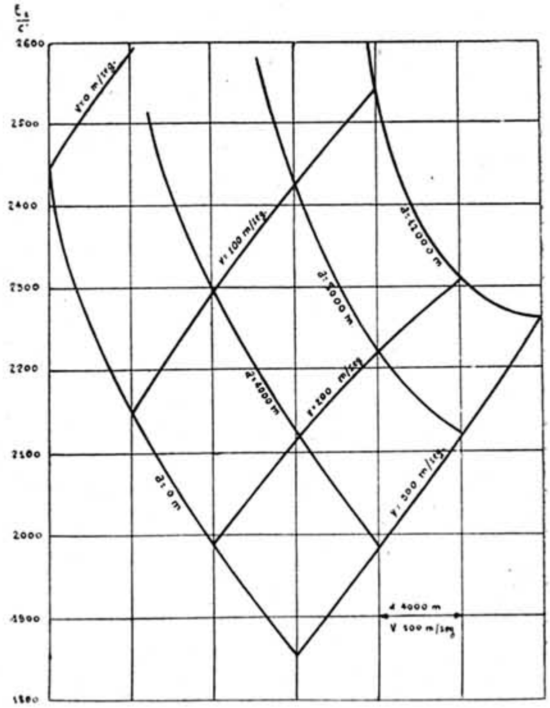

Figura 8.

bustible + agua) respecto al consumo de combustible sin inyección de agua. Esta relación está dada por

$$\frac{A + C'}{C} = \frac{(1 + \xi)(1 + \alpha)}{1 + \alpha'};$$

que para $V = 0$ y $a = 0$, o sea, en condiciones de despegue, vale:

$$\frac{A + C'}{C} = 12{,}34;$$

ya que

$$A = 5{,}38 \text{ kg/seg.}$$
$$C' = 1{,}04 \text{ kg/seg.}$$
$$C = 0{,}52 \text{ kg/seg.}$$

Esto supone un consumo entre agua (5,38 kilogramos por segundo) y combustible (1,04 kilogramos por segundo) extraordinariamente superior al consumo de combustible sin inyección de agua (0,52 kilogramos por segundo).

Estudiando esta relación en otras condiciones de vuelo diferentes, se llega a valores similares, pudiéndose apreciar la imposibilidad de mantener un funcionamiento continuo con inyección de agua por los enormes consumos a que da lugar.

Los valores de esta expresión están representados en la siguiente tabla:

TABLA III

a_{metros} / $V_{m/seg.}$	0	4.000	8.000	12.000
100	12,6	11,5	10,55	9,95
200	13,1	12,1	11,2	10,5
300	14,3	13,2	12,1	11,35

Veamos ahora rápidamente algo sobre tiempos de funcionamiento. Supongamos un avión con un peso total de unos 6.500 kilogramos, equipado con el turborreactor al que hemos hecho aplicación del estudio de inyección, y con una capacidad para 2.000 kilogramos entre combustible y agua.

Estudiando el funcionamiento de la inyección de agua para el despegue, y considerando que sean veinte segundos el tiempo que tarde en despegar, y con un margen de cinco segundos antes de empezar a rodar y otros cinco después de despegar, se tiene como tiempo total de funcionamiento treinta segundos. En estos treinta segundos el consumo de combustible ha sido:

$$30 \times 1{,}04 = 31{,}2 \text{ kg.}$$

y el del agua:

$$30 \times 5{,}38 = 161{,}4 \text{ kg.}$$

o sea, el 1,56 por 100 y el 8,06 por 100 de la capacidad total, respectivamente, que representan un total del 9,6 por 100 de los depósitos.

Estas cifras, como se ve, son extraordinariamente elevadas y hacen que la inyección de agua sea francamente prohibitiva en estas condiciones. Se puede hacer la objeción de que tanto el consumo de combustible como el de agua se reducirían si en vez de haber hecho $\alpha' = 1$ se hubiera tomado α' mayor; por ejemplo: $\alpha' = 2$, resultando entonces $C' = 0{,}69$ kg/seg.

$$\xi = \frac{15}{1{,}9 + \dfrac{1.900 + 1{,}1\ T_2}{T_3 - T_2}} = 2{,}58\ V_s/\text{seg.}$$

$I_1 = 0{,}25$; $n = 5{,}8$, siendo la relación de gastos de gases $M'/M = 1{,}0575$, lo que proporciona una mejora del empuje en el despegue de casi un 6 por 100.

Funcionando a grandes velocidades, este valor es superior, aunque siempre inferior a los obtenidos con $\alpha' = 1$.

Como se ve en estas notas, para aumentar el empuje en el despegue es más conveniente recurrir al empleo de cohetes de despegue y dejar la utilización de la inyección de agua sólo a grandes velocidades y con valores de α' del orden de 2 a 2,5, que dan aumentos del empuje aceptables a esas velocidades y con un consumo mucho más moderado.

Otra cuestión a investigar experimentalmente es la forma en que la inyección de agua afecta a los rendimientos de la combustión y de la turbina, que hemos supuesto que no variaban.

El régimen de funcionamiento de la turbina, así como el del compresor, se encuentran modificados, aunque no excesivamente, por lo que habría que ver si era necesario efectuar una adaptación para el caso de funcionamiento con inyección de agua.

Las notas anteriores resumen un estudio preliminar sobre el aumento de empuje en los turborreactores mediante inyección de agua, y sus conclusiones no deben tomarse sino como una primera aproximación a la solución de este problema, que es esencialmente de banco de pruebas.