Aerotecnia

Sobre el barrido en los motores de dos tiempos

Por RICARDO VALLE

Alumno de la Escuela Superior Aerotécnica

De los problemas teóricos más complicados que se presentan en los proyectos de motores de dos tiempos, es el barrido uno de ellos; en éste, como en la gran mayoría de las cuestiones que se plantean en la «Mecánica de Flúidos», las dificultades de introducir en los cálculos las particularidades reales de los flúidos, hacen casi imposibles las soluciones con un grado de rigor elevado. No obstante, al proyectista le basta una norma para poder dimensionar con una aproximación satisfactoria, ya que esta clase de problemas es siempre ultimada experimentalmente.

Antes de nada conviene observar que el reglaje de admisión y escape debe hacerse en forma tal, que abra y cierre antes el escape que la admisión. Lo primero es evidentemente necesario, y con lo segundo, si la presión de barrido es superior a la atmosférica, puede conseguirse en el cilindro una sobrepresión en el momento de comenzar la compresión, que elevará considerablemente el rendimiento térmico del ciclo.

Diversas soluciones tiene la realización del reglaje en la forma dicha: lumbreras de admisión y válvulas de escape; válvulas de admisión y lumbreras de escape o lumbreras para admisión y escape. Las válvulas para admisión y escape restarían al motor de dos tiempos la ventaja de su supresión total o parcial. Las lumbreras para admisión y escape necesitan casi siempre artificios particulares, que suelen lograrse haciendo trabajar dos émbolos con una sola cámara de combustión.

Dividamos el barrido en dos partes que corresponden a los períodos comprendidos entre aperturas de escape y admisión y entre apertura y cierre de admisión.

Fijemos el siguiente reglaje:

$$\text{Escape}\ldots\left\{\begin{array}{l}\text{abre } a^o \text{ A. P. M. I.}\\ \text{cierra } c^o \text{ D. P. M. I.}\end{array}\right.$$

$$\text{Admisión}\ldots\left\{\begin{array}{l}\text{abre } b^o \text{ A. P. M. I.}\\ \text{cierra } d^o \text{ D. P. M. I.}\end{array}\right.$$

Primera parte

Nos encontraremos en el momento en que comienza a abrirse el escape y sabemos que en el cilindro hay gases quemados con una presión P_A, una temperatura T_A y en un volumen V_A. Si llamamos P_B a la presión de barrido, durante el período $a^o \rightarrow b^o$ (A. P. M. I.) la presión en el cilindro debe bajar desde P_A hasta P_B y el volumen sabemos que ha aumentado desde V_A hasta V_B.

El peso de los gases quemados cuando estamos en la posición a^o A. P. M. I., es aproximadamente:

$$G_a = 1{,}29 \cdot 273 \frac{P_A\ V_A}{T_A}$$

y el peso que debe quedar en el cilindro en el momento de comenzar a abrirse la admisión es:

$$G_b = 1{,}29 \cdot 273 \frac{P_B\ V_B}{T_B}.$$

Ha debido salir, por lo tanto, durante esta primera parte del barrido, un peso de gases:

$$G = G_a - G_b.$$

Este peso representa un volumen en las condiciones atmosféricas exteriores al cilindro

$$v = \frac{G}{\delta},$$

en la que δ es la densidad de la atmósfera donde se calcula el ciclo.

La velocidad de salida (adiabática) de un gas que se encuentra en un recipiente a temperatura T, siendo t la del medio que le rodea y en el supuesto de una correspondencia adiabática de los dos medios, es:

$$w = k\sqrt{2gCE\,(T - t)}$$

en la que g es la aceleración de la gravedad, C el calor específico a presión constante, E el equivalente mecánico del calor y k un coeficiente experimental algo inferior a la unidad que depende de la viscosidad, forma del agujero de salida, forma del recipiente, etc.

Entonces las velocidades iniciales y finales del intervalo que nos ocupa son:

$$w_A = k\sqrt{2 \cdot g \cdot C \cdot E\,(T_A - t)}$$

y

$$w_B = k\sqrt{2g \cdot C \cdot E\,(T_B - t)}.$$

Si hacemos la hipótesis de una variación lineal de la velocidad durante el cortísimo intervalo de tiempo en que se ejecuta la primera parte del barrido, o sea durante

$$\frac{(a^o - b^o) \cdot 60}{n \cdot 360} \text{ segundos,}$$

en la que n es el número de vueltas por minuto del cigüeñal, la velocidad media de salida de los gases es:

$$w_m = \frac{w_A + w_B}{2}.$$

La sección de salida S es evidentemente una función determinada del ángulo θ de giro del cigüeñal.

Si llamamos S_m al valor medio de la sección de salida durante el período $a^o \rightarrow b^o$ deberá verificarse:

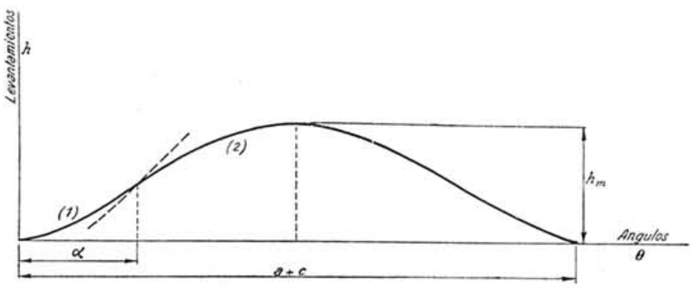
$$w_m \cdot S_m \frac{(a^o - b^o) \cdot 60}{n \cdot 360} = v.$$

De esta fórmula se deduce el valor que debe tener S_m, pues todo lo demás es conocido, y el problema se reduce a obtener este valor de S_m mediante las dimensiones convenientes de las lumbreras o válvulas de escape.

Supongamos por ejemplo que el escape se efectúa por una válvula. Podemos fijar la leva y determinar las dimensiones de la válvula, o fijar ésta y determinar la leva que proporcione la sección media de paso dada.

Fijemos en d el diámetro menor de la válvula de escape, con un ángulo de asiento w.

Supongamos una leva de acción sobre plato, del tipo llamado de *aceleración constante*. Sabido es que se denominan así a las levas que proporcionan una curva de levantamiento como la de la figura



formada por tres parábolas que se acuerdan tangencialmente, formando un conjunto simétrico respecto a la ordenada de levantamiento máximo.

Fijado en $a + c$ grados el ángulo que permanece abierta la válvula, y decidido el tipo de leva de aceleración constante, quedan aún por determinar los dos parámetros siguientes:

Abscisa α del punto de inflexión.

Levantamiento máximo h_m.

Como sólo dispondremos de una ecuación para determinarlos, fijaremos uno de ellos, por ejemplo, el h_m. Entonces las ecuaciones de las parábolas [1] y [2] cuyos vértices y ejes son conocidos, se deducen fácilmente por las condiciones de cortarse en el punto de abscisa α y tener en él igual tangente. Estas ecuaciones resultan ser:

[1] $$h = \frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\alpha}\theta^2$$

[2] $$h = h_m - \frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\left(\frac{a+c}{2} - \alpha\right)}\left(\theta - \frac{a+c}{2}\right)^2.$$

El área de la sección de paso que deja la válvula en función del levantamiento h, del diámetro menor d y del ángulo del asiento ω, es:

$$\text{Area} = \pi\,(d \cdot h \cdot \cos\omega + h^2 \operatorname{sen}\omega \cos^2\omega).$$

Para obtener este área en función del ángulo de giro θ, bastará sustituir h por las expresiones anteriormente encontradas, pero teniendo cuidado de utilizar la primera parábola para valores de θ menores que α y la segunda para valores mayores. Se obtienen así las expresiones:

$$S_1 = \pi\left[d \cdot \cos\omega \cdot \frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\alpha}\theta^2 + \operatorname{sen}\omega\cos^2\omega\left(\frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\alpha}\theta^2\right)^2\right] = A\,\theta^2 + B\,\theta^4$$

y

$$S_2 = \pi\left[d\cos\omega\left(h_m - \frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\left(\frac{a+c}{2} - \alpha\right)}\left(\theta - \frac{a+c}{2}\right)^2\right) + \right.$$
$$\left. + \operatorname{sen}\omega \cdot \cos^2\omega\left(h_m - \frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\left(\frac{a+c}{2} - \alpha\right)}\left(\theta - \frac{a+c}{2}\right)^2\right)^2\right] =$$
$$= C + D\,\theta + E\,\theta^2 + F\,\theta^3 + G\,\theta^4.$$

En las que A, B, C, D, E y F son funciones sencillas racionales de α.

Podemos ya plantear la ecuación que nos permitirá encontrar α, igualando el valor medio de las secciones al anteriormente fijado S_m.

Esta ecuación será:

$$S_m = \frac{\int_0^{\alpha} S_1\,d\,\theta + \int_{\alpha}^{a-b} S_2\,d\,\theta}{a - b},$$

puesto que, como hemos dicho, las expresiones de S son diferentes para valores de θ menores y mayores que α.

Realizando las integrales tenemos:

$$S_m\,(a-b) = C\,(a-b) + D\frac{(a-b)^2}{2} + E\frac{(a-b)^3}{3} +$$
$$+ F\frac{(a-b)^4}{4} + G\frac{(a-b)^5}{5} - \alpha\,C - \alpha^2\frac{D}{2} - \alpha^3\frac{E-A}{3} -$$
$$- \alpha^4\frac{F-B}{4} - \alpha^5\frac{G}{5}.$$

Recordando los valores de A, B, C, D, E, F y G tenemos aquí una ecuación de quinto grado en α, cuyas raíces resolverán el problema de la primera parte del barrido. Conviene aquí hacer algunas observaciones:

1.ª La raíz α elegida tiene que ser positiva y menor que $a - b$.

2.ª Caso de que varias raíces positivas y menores que $a - b$ satisfagan a la ecuación, debe elegirse aquella que proporcione una menor aceleración a la válvula, o sea la mayor raíz comprendida entre o y $a - b$, puesto que la aceleración es proporcional, primero a

$$\frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\alpha}$$

y después a

$$\frac{h_m}{\frac{a+c}{2}\left(\frac{a+c}{2} - \alpha\right)}$$

y son más peligrosas las aceleraciones grandes en el primer período que en el segundo.

3.ª Cualquier valor de α comprendido entre o y $a - b$ que haga mayor al segundo miembro de la ecuación que al primero, indica que la sección media de paso es mayor que la necesaria, por lo que al aproximar las raíces, debe hacerse por el lado positivo de la curva representativa de la ecuación, con el fin de tener la seguridad de que al iniciarse la admisión, la presión en el cilindro es a lo sumo igual a la de barrido.

4.ª Si la ecuación no tuviese raíces apropiadas, se modificará el diámetro de la válvula o el levantamiento máximo hasta lograrlo, aumentándolos o disminuyéndoles según que el segundo miembro sea menor o mayor que el primero para los valores de α comprendidos entre o y $a - b$.

Si en vez de efectuarse el escape por válvulas se hiciese por lumbreras, sólo habría que modificar la expresión de S en función de θ y elegir como incógnita cualquiera de las dimensiones, fijando todas las demás.

Segunda parte

Comienzan ahora a abrirse las lumbreras de admisión y nos encontramos frente al problema siguiente: un recipiente de volumen variable según una ley conocida, contiene gas a presión y temperatura dadas; comunica por dos agujeros, de secciones cuyas leyes de variación se conocen, con dos medios de presión y temperatura constantes, en correspondencia adiabática con el gas del recipiente (hipótesis), de tal manera que la presión del recipiente está comprendida entre las de los dos medios. Se desea saber la evolución del gas en el recipiente.

Sumamente complicado es este problema y por ahora nos bastará con una solución aproximada. Consiste ésta en suponer constantes todos los valores durante cortos intervalos (de 10 en 10 grados del cigüeñal por ejemplo), calcular en cada uno de ellos el volumen del gas v_1 que entra en el cilindro, y el volumen v' que sale, para lo cual se conocen las diferencias de presiones y las secciones de entrada y salida, así como el intervalo de tiempo que hayamos fijado; reduciremos el volumen v' al interior del cilindro, es decir, obtendríamos el volumen v_2 a que se reduce el v', cuando adiabáticamente se aumenta la presión desde la exterior hasta la del cilindro, y si el volumen del cilindro ha aumentado en v y era V, obtendremos las nuevas características del gas en el cilindro, suponiéndole que evoluciona adiabáticamente desde el volumen:

$$V + v_1 - v_2$$

hasta el volumen:

$$V + v.$$

Haciendo esto para todos los intervalos en que hayamos dividido la segunda parte del barrido, o sea el período $b^o \rightarrow d^o$, sabremos cuál es la presión en el cilindro en el instante en que cerradas ya las lumbreras de admisión, comienza la compresión y con ella el nuevo ciclo. Si sumamos todos los volúmenes v_1 sabremos si el barrido se ha verificado satisfactoriamente, pues bastará comparar esta suma con el volumen de gases que había en el momento de abrirse la admisión. Un exceso del 10 por 100 en la suma, indica un buen barrido.

Para toda esta segunda parte es necesario dar previamente las dimensiones de las lumbreras o válvulas de admisión; pero teniendo en cuenta que la exactitud de la solución depende de la pequeñez de los intervalos, puede hacerse rápidamente un ensayo con dimensiones aproximadas por comparación con motores de buen funcionamiento práctico y con intervalos grandes (20 en 20 grados), afinando después sobre una sola dimensión tanto como se desee.

Si, por ejemplo, se trata de lumbreras rectangulares para la admisión, la expresión de la sección de entrada, en función de los ángulos θ, es:

$$S = \left[\frac{l}{2} (1 - \cos\theta) + \frac{l}{8\gamma} \operatorname{sen}^2 \theta - h_0 \right] e,$$

en la que

l es la carrera.

θ el ángulo de la muñequilla del cigüeñal, a partir del punto muerto superior.

γ la relación de la longitud de la biela a la de la carrera.

h_0 el recorrido del émbolo cuando empieza a abrirse la admisión, o sea:

$$h_0 = \frac{l}{2} (1 + \cos b) + \frac{l}{8\gamma} \operatorname{sen}^2 b$$

y e el ancho de las lumbreras.

Para más facilidad, los cálculos pueden hacerse con la ayuda del siguiente cuadro:

θ	S_e	S_s	P	T	V	w_s	w_e	v_1	v_2

En la que las letras representan lo que sigue:

θ Ángulos del cigüeñal.
S_s Sección de salida.
S_e Sección de entrada.
P Presión del cilindro.
T Temperatura del cilindro.
V Volumen del cilindro.
w_s Velocidad de salida.
w_e Velocidad de entrada.
v_1 Volumen que entra.
v_2 Volumen que sale.

La tres primeras columnas se pueden llenar desde el principio. Después, conocidos los valores que encabezan las tres columnas siguientes, se llena fácilmente todo el cuadro.

La suma de la penúltima columna, comparada con el valor que encabeza la sexta, nos permite ver si el barrido se ha efectuado satisfactoriamente.