

Planta motriz del cohete de largo alcance A-4 (V-2)

Descripción, funcionamiento y características

Por ANTONIO GONZALEZ-BETES FIERRO

Teniente Cadete del 6.º curso de Ingenieros Aeronáuticos.

GENERALIDADES

El motor-cohete del cohete de largo alcance A-4 (V-2) es hasta hoy día el tipo de motor mejor logrado y ha sido la clave para todos los desarrollos ulteriores en motores-cohete. En España no hemos encontrado ninguna descripción completa de este motor, de su funcionamiento y características, por lo cual nos hemos decidido a hacerlo objeto de un artículo. Aunque desde el 8 de septiembre de 1944, día que estalló la primera V-2 sobre Londres, han transcurrido varios años, no por eso ha perdido interés el conocimiento del motor que propulsaba dicho cohete: más bien creemos que ha ganado.

La V-2 siguió funcionando después de la paz. Algunos de los cohetes que los americanos capturaron en Alemania Occidental, se han elevado en los terrenos de White Sands (Méjico), explorando la atmósfera y fotografiando la tierra desde gran altura. La V-2 alemana alcanzaba

120 kilómetros de altura. Los americanos la perfeccionaron consiguiendo una cota de 180 kilómetros y un alcance de 300 kilómetros. Ultimamente, la V-2, como primer escalón de un cohete de dos escalones, hizo posible que el Wac-Corporal alcanzase los 400 kilómetros de altura.

Derivado del A-4, con varias cámaras de combustión, surgió el motor RM 6.000 C4, que equipó el avión supersónico XS-1. El empuje era sólo de 2.720 kilogramos y la mezcla de propulsión utilizada, era la misma del A-4. En este motor la alimentación se mantenía por un gas inerte a presión.

Después en el Skyrocket D-558-2 se le montó una turbo-bomba que suministraba la presión necesaria al combustible y al oxidante.

Los cohetes Viking 7 y Neptune también llevan motores derivados del A-4.

Estas breves consideraciones nos confirman lo que anteriormente dijimos: el haber sido este motor la clave para futuros desarrollos y de gran interés el

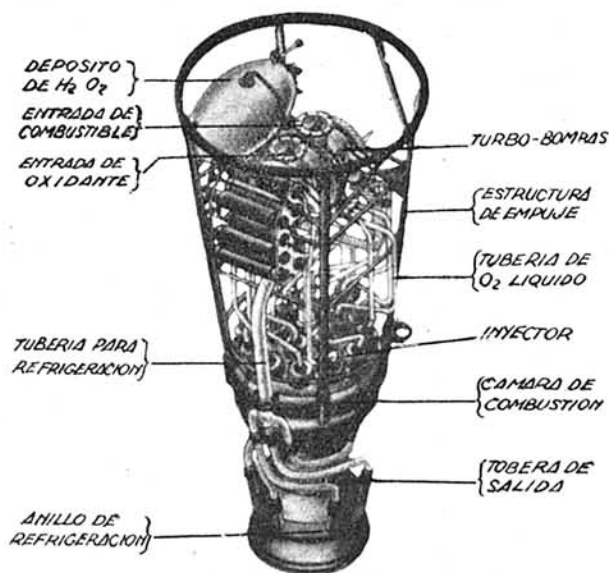


Fig. 1.

Vista anterior de la planta motriz A-4.

conocer y desvelar los secretos de este motor.

El A-4 que vamos a describir fué des-
arrollado en Peenemünde.

CONSTRUCCION

El motor consta de cámara de combustión y tobera de tipo Laval, unidas a una estructura circular de acero. Esta estructura soporta el conjunto de turbina-bombas, depósitos de agua oxigenada y solución de permanganato. La tracción se toma a través de cuatro juntas de rótula (figuras 1 y 1 A).

DESCRIPCION

Depósito de combustible.

Colocado en la parte más superior del cohete (figura 2), se encuentra el depósito de combustible (alcohol hidratado). Es cilíndrico con cabezas redondeadas. Su longitud es de 2,40 metros y su peso de 115 kilogramos. Lleva en su parte superior tres orificios (fig. 2). El orificio (A) para llenado del depósito. El (B) lleva inserta una tubería que conduce el nitrógeno a presión (para crear presión adicional en la cabeza del tanque). El (C) lleva inserta otra tubería que conduce a la ojiva del cohete y que por medio del efecto "ram" produce también presión adicional en la cabeza del tanque. En la parte inferior lleva una válvula (D) de purga y una válvula (E) de salida, movida por control remoto; de E, parte una tubería que conduce el combustible a la correspondiente bomba centrífuga.

Depósito de oxidante.

Colocado en el centro del cohete (figura 2), debajo del depósito de alcohol, se encuentra el depósito de oxígeno líquido.

Es de la misma forma que el depósito de combustible. Su longitud es de 3,65 metros y su peso de 170,5 kilogramos. Está construido de aleación de aluminio. Va atravesada axialmente por la tubería que conduce el combustible. En la cabeza lleva un orificio (G) para el llenado. Está recubierto de una espesa capa de lana de vidrio interpuesta entre la estructura del cohete y la pared exterior, para evitar lo más posible la evaporación del oxígeno líquido. En (H) se encuentra una tubería que conduce el vapor de oxígeno (crea presión adicional en la cabeza, 1,4 atmósferas), producido al evaporar una pequeña cantidad de oxígeno líquido que sale de la bomba centrífuga y que pasa a un recuperador de calor, que funciona aprovechando la entalpía residual de los gases de escape de la turbina. En la parte inferior se encuentra un orificio (I), que lleva inserta una tubería para conducir el oxígeno líquido a la bomba centrífuga.

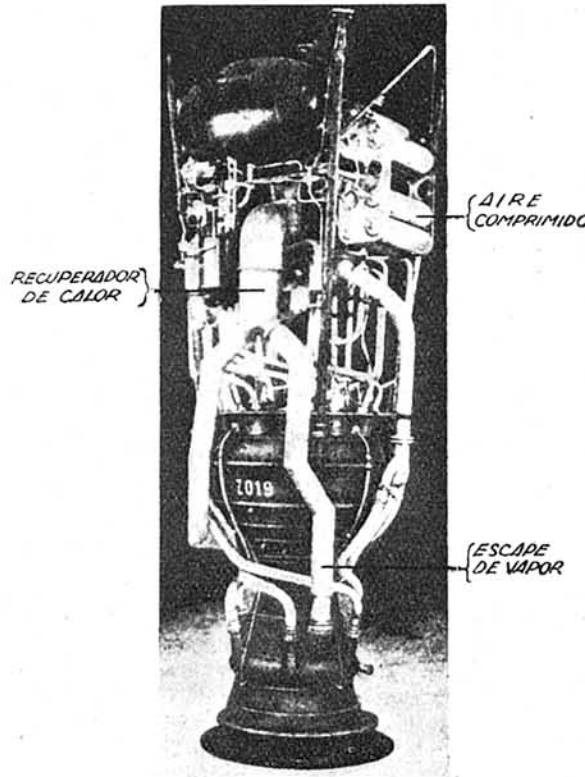


Fig. 1 A.

Vista posterior de la planta motriz A-4 (reproducida de G. P. Sutton: "Rocket Propulsion Elements").

En la parte superior del cohete (en el compartimiento de control), se encuentran seis depósitos de acero que contienen nitrógeno o helio a una presión de 238 at-

Depósitos de gas a presión.

En la parte superior del cohete (en el compartimiento de control), se encuentran seis depósitos de acero que contienen nitrógeno o helio a una presión de 238 at-

mósferas absolutas. Estos depósitos están unidos por una tubería común que lleva un manómetro, una válvula manual de cie-

do hacia el generador de gas. En la parte inferior lleva inserta una tubería (con una válvula de control) (P), que conduce el líquido al generador de gas.

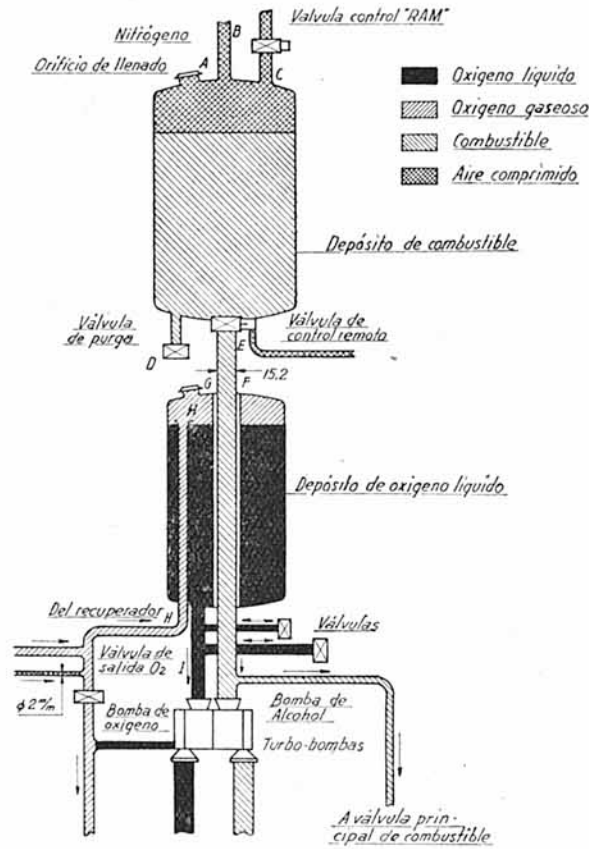


Fig. 2

re y una válvula accionada por un control remoto. Desde la válvula, la tubería va a unirse al depósito de combustible.

Depósito de agua oxigenada.

Está construido de aluminio puro (99,6 por 100) y tiene la forma de un elipsoide de revolución (figura 3). Lleva en su parte superior un orificio para la carga (M) y una tubería de salida (N) (desahogo). Por esta tubería, en su parte media (O), se inserta la conducción de aire comprimido que suministra presión para empujar al líqui-

Depósito de solución de permanganato.

Colocado debajo del depósito de H₂O₂. En la figura 3 se observa claramente la disposición de este depósito y sus tuberías.

Por (Q) escapa el líquido hacia el generador de gas, empujado por la presión creada por el aire comprimido que entra en el depósito por (R) y (S).

Depósitos de aire comprimido.

Para crear la presión necesaria que empuje el agua oxigenada y la solución de permanganato hacia el generador de gas. Son de acero y en número de siete. Su colocación en la estructura del motor a un lado del conjunto turbina-bombas, se observa fácilmente en la fotografía del motor (fig. 1).

Cámara de combustión.

Cámara esférica de chapa soldada de acero, con triple pared y anillos de expansión ondulados. La cabeza en forma de cúpula contiene los inyectores, del tipo de "copa" en número de dieciocho. En la cúpula se encuentra, asimismo, la válvula principal de combustible. Todos los de-

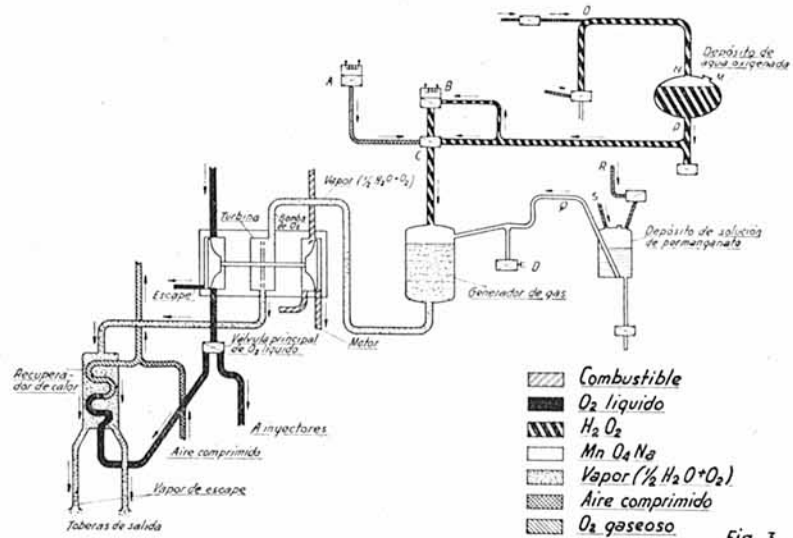


Fig. 3

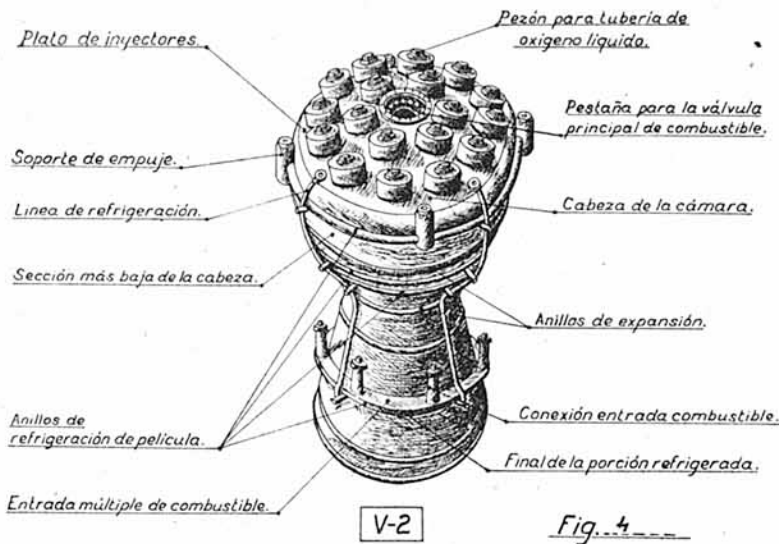


Fig. 4

El detalle de la cámara de combustión se detallan en la figura 4.

Tobera de salida.

La tobera es de tipo Laval (convergente-divergente). Está unida a la cámara de combustión formando una sola pieza. El ángulo de divergencia es de 12° 30'. La parte final no está refrigerada. Está aislada con lana de vidrio.

Refrigeración.

Es de tipo regenerativo, en la cual el combustible antes de la inyección circula alrededor de una camisa exterior, que rodea la cámara y parte de la tobera.

Detalles de la refrigeración pueden verse en las figuras 4 y 5.

El combustible penetra por (T) en la camisa y recorre ésta en sentido axial (fig. 5) hasta llegar a los inyectores en donde se mezcla con el oxígeno líquido formando la mezcla de propulsión que arderá en la cámara.

Para ayudar a la refrigeración regenerativa se incorpora a la cámara y tobera en lugares críticos, cuatro anillos circulares

con pequeños orificios que introducen el líquido en la cámara. La película que resulta en el interior de la cámara, cerca de las paredes, reduce la cantidad de calor que se transmite a ésta. Los lugares de colocación de los anillos se observan en la figura 4. Los orificios miden 2,5 milímetros de diámetro y se encuentran separados unos 20 milímetros (figuras 5b y 5c). Ahora bien, se ha observado en este motor una pequeña pérdida de energía, como si algo de

la película pasase fuera de la cámara sin entrar en reacción.

Inyectores.

La cámara de combustión lleva en su parte superior una cúpula, que es lo que se llama "plato de inyectores" o cabeza de inyección (fig. 4). En esta cabeza lleva 18 inyectores del tipo de "copa", que son típicos de este motor que estamos describiendo.

Los 18 inyectores están dispuestos en dos anillos concéntricos, o sea, 12 inyectores en la circunferencia exterior y seis inyectores en la circunferencia interior.

Cada inyector está constituido de la siguiente forma:

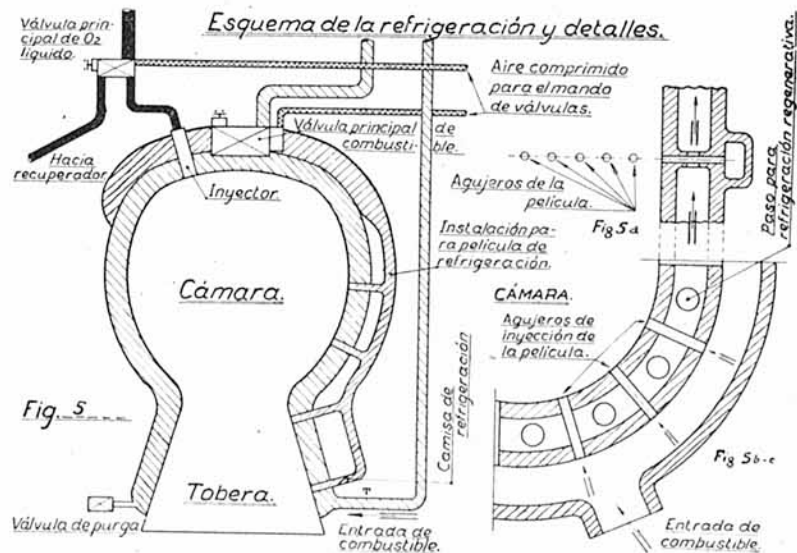


Fig. 5

a) Una tobera de inyección de oxígeno líquido en el centro del inyector, con 120 orificios dispuestos en siete anillos.

b) Cuarenta y ocho orificios de inyección de combustible, dispuestos en tres filas con inyecciones cruzadas.

Conjunto turbina-bombas.

El objeto de las bombas centrífugas es el siguiente: un motor-cohete, funciona con una presión p_c en la cámara de combustión. El combustible y el oxidante tienen que entrar con una presión mayor que p_c . Un medio fácil y cómodo sería poner el combustible y el oxidante a una presión mayor que p_c , pero si el cohete es grande da lugar a tanques muy pesados.

El conjunto de turbina-bombas, se observa claramente en la figura 1. Las bombas son difíciles de calcular, pues tienen que ser de alta presión, ligeras, pequeñas y de gasto elevado.

Entre las bombas centrífugas y en el mismo eje que ellas, se encuentra una turbina de vapor (fig. 6) de dos escalones de velocidad, movida por vapor supercalentado, producido en la descomposición del agua oxigenada (catalizada por solución permangánica) en un generador de vapor. Todas las partes de la turbina están fabricadas de aleación de aluminio.

Las características de la turbina y de las bombas centrífugas se detallan en las tablas 5 y 6.

Generador de gas.

Su misión es producir el vapor que moverá la turbina.

El MnO_4Na fluye al generador de vapor empujado por el aire comprimido y cierra el mecanismo que controla el funcionamiento de las válvulas *A* y *B* y asegura la llegada del MnO_4Na antes que el H_2O_2 al generador.

En la figura 1A, se ve claramente la disposición del generador de gas y el conjunto turbina-bombas. En la figura 3, observamos el esquema de este generador.

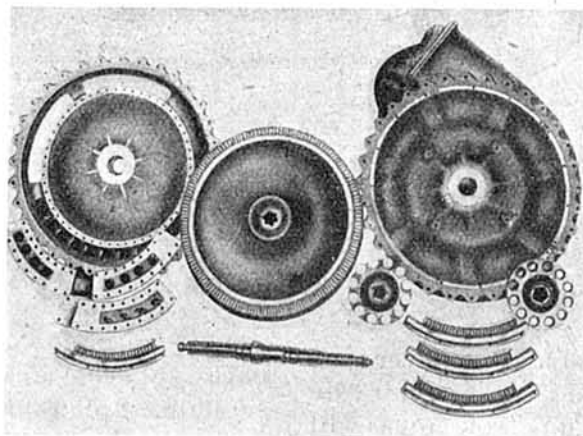


Fig. 6.

TURBINA.—*Despiece de la turbina. En el centro el rotor con los álabes y debajo del rotor, el eje. A la derecha sección de escape, y soportes de cojinetes; abajo secciones de toberas. A la izquierda, distribuidores de vapor y una sección de toberas.*

Recuperador de calor.

El recuperador de calor, tiene por objeto aprovechar la entalpía residual de los gases de escape de la turbina.

Al abandonar los gases la turbina (fig. 3), son conducidos a un mecanismo que aprovecha esta entalpía y calienta la corriente de oxígeno líquido que procede de la válvula principal de oxidante. Este oxígeno líquido pasa a gaseoso y se conduce a la cabeza del tanque de oxidante,

creando presión adicional (2 a 2,3 atmósferas) para ayuda a la bomba centrífuga. Un efecto secundario es ayudar a la turbina, porque disminuye la presión de salida del vapor.

Ignición.

La mezcla de propulsión usada por el motor A-4, no es autoinflamable, por tanto necesita absorber energía para empezar la combustión. Esta energía es suministrada por el sistema de ignición, que debe estar colocado cerca de los inyectores y no debe obstruir el proceso de combustión.

La ignición del motor A-4, se produce por un "ignitor" de carga de pólvora. La

pólvora se inflama eléctricamente. Este cohete se introducía en la cámara de combustión a través de la tobera. El "ignitor" con cargas múltiples de pólvora montadas en un disco, montado éste a su vez en una varilla, es pivotado al interior de la cámara de combustión. La varilla está montada en la plataforma de lanzamiento. El giro del disco distribuye uniformemente la llama en el interior de la cámara de combustión.

Mezcla de propulsión principal.

La mezcla de propulsión, como hemos dicho anteriormente, se compone de alcohol etílico hidratado (combustible) y oxígeno líquido (comburente). Las características principales del combustible y comburentes se dan en la tabla 1.

Las características de la mezcla se dan en la tabla 2.

Control.

Todo el motor se encuentra controlado por válvulas, unas movidas eléctricamente y otras accionadas por aire comprimido.

Existen válvulas de apertura y cierre, de retención, de salida y de seguridad. Las más importantes son las válvulas principales y las de salida de combustible y oxidante. Las de regulación de la presión del aire comprimido y de efecto de toma dinámica y las de control para evitar el paso del H_2O_2 antes que el MnO_4Na (riesgo de explosión).

Existe un complicado sistema de tuberías que hemos ido describiendo anteriormente, que unen las distintas partes del motor.

FUNCIONAMIENTO

Una vez hecha la descripción del motor, vamos a pasar a su funcionamiento. Lo haremos montado en el cohete V-2 y seguiremos el funcionamiento del motor desde que se pone en marcha hasta que cesa de funcionar, cuando el cohete casi ha salido fuera de la atmósfera.

Supongamos que el cohete está coloca-

do ya en su plataforma de lanzamiento (el transporte se hace sobre una plataforma especial). Antes de poner en marcha el motor hay que proceder a una inspección completa de válvulas y mecanismos y a continuación proceder al llenado de los depósitos que se hace en el siguiente orden:

1) Alcohol. 2) Oxígeno líquido. 3) Agua oxigenada, y 4) Permanganato.

Seguidamente se abre la válvula de salida de combustible para permitir por gravedad (el cohete se encuentra colocado verticalmente) el llenado de la camisa de refrigeración, la bomba de combustible (esto evita el cebado de la bomba centrífuga) y tuberías.

Se regula entonces la presión del aire a 30,8 atmósferas y se le da presión al tanque de oxígeno (1,5 atmósferas) para prevenir la cavitación en la bomba centrífuga al principio de su funcionamiento. Se deja que el combustible llegue a la válvula colocada en la cabeza de la cámara de combustión (válvula principal).

A continuación se enciende el "ignitor". El oxígeno a flujo reducido se admite entonces en la cámara de combustión. Igualmente el combustible, abriendo la válvula principal; se produce la ignición de la mezcla y el motor empieza a rugir; se observa la llama que sale por la tobera y si es satisfactoria la combustión, el operador da la señal para poner en marcha el mecanismo auxiliar. El empuje que proporciona el motor es ahora muy reducido (los tanques se encuentran aislados por una espesa capa de lana de vidrio; a pesar de este aislamiento era imposible dilatar el lanzamiento del cohete. Según informes que obran en poder de los aliados, se perdían dos kilogramos de oxígeno por minuto. Téngase en cuenta la inmensa evaporación que experimenta el oxígeno que se encuentra líquido a $-184^{\circ}C$).

Se corta el aire que suministra presión al tanque de oxígeno. Se abre la válvula que da presión con aire a los tanques de agua oxigenada y permanganato potásico. El MnO_4Na fluye al generador y cierra un mecanismo a presión que evita la llegada

del H_2O_2 antes que el MnO_4Na . Se abren dos válvulas permitiendo que el H_2O_2 pase al generador de gas. Se genera allí vapor (por catalisis) a presión y a baja temperatura ($400^\circ C$) y este vapor hace mover la turbina (que a los tres segundos funciona a toda marcha) que mueve a su vez las bombas, incrementando el flujo de combustible y oxidante a la cámara de combustión. La presión de las bombas al aumentar, abre completamente las válvulas, fluyendo el máximo flujo al motor, y el empuje, habiendo crecido rápidamente hasta llegar a unos 25.000 kilogramos, es más que suficiente para que el proyectil se eleve lentamente desde la plataforma de lanzamiento. Despegar el cohete aproximadamente a los ocho segundos.

Durante el vuelo el funcionamiento del motor varía poco: solamente una pequeña cantidad de oxígeno líquido fluye a través de una válvula de retención y se evapora en el recuperador de calor. Esto permite dar ligera presión al tanque de oxígeno (2,3 atmósferas). El efecto de toma dinámica permite dar al tanque de combustible ligera sobrepresión a través de una válvula que funciona según un programa ya fijado en tierra. Cuando el proyectil sale de la atmósfera, se le da presión al combustible con nitrógeno previniendo

así el colapso del tanque. La variación del empuje con el tiempo y la altura se da en la figura 7.

Características y actuaciones.

Una vez hecha la descripción y estudiado el funcionamiento, pasemos a dar los datos relativos al motor.

En la tabla 3 se detallan los metales empleados en este motor.

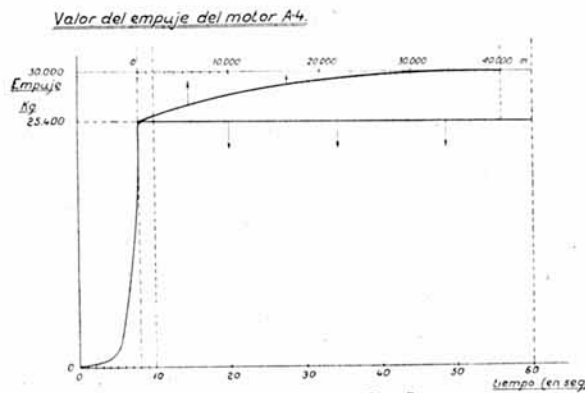
En la tabla 4 hemos reunido todas las características interesantes de la planta motriz.

En las tablas 5 y 6 se detallan las características de la turbo-bomba.

CONCLUSIONES

A través de este artículo, habrá podido fijarse el lector en la enorme complejidad de los

problemas que se plantearon a los científicos en el desarrollo de este motor. Fué una labor llena de dificultades y donde el estudio teórico iba acompañado de una profunda experimentación, erizada algunas veces de peligro. No queremos terminar este artículo sin hacer referencia al hombre de ciencia Hermann Oberth, cuyas ideas fundamentales y estudios teóricos, fueron la clave para el desarrollo de este motor. Aunque tarde, sirva este artículo de homenaje a tan insigne científico.



BIBLIOGRAFIA

G. P. Sutton, "Rocket propulsion elements". 1949.
 Paul H. Wilkinson, "Aircraft engine of the World". 1947.
 Zucrow M. J., "Principles of Jet Propulsion and gas Turbines".
 Willy Ley, "Rockets". 1947.

REVISTAS

Aircraft Engineering. Vol. 18, págs. 206, 336. Año 1946. "Evolution of energy in Jet and Rocket propulsion", por Bielkowitz P.
Aviation. Mayo 1946. "V-2's Power Plant

Provides Key to Future Rocketry", por Roy Healy.
Air trails Pictorial. Marzo 1946. "V-2 and beyond", por Willy Ley.
Aero-Digest. Noviembre 1947. "Desarrollo del motor-cohete", por Roy Heale.
Aeroplane. 28 de mayo de 1948. "Proyectiles dirigidos."
Aeroplane. 27 de julio de 1915: 15 de diciembre de 1944.
Flight. 8 de noviembre de 1945. "German Long-range Rocket Development", por Peerring W. G.

T A B L A I

Datos sobre el combustible, oxidante y mezcla para el mecanismo auxiliar del motor-cohete A-4.

Sustancia	Alcohol etílico	Oxígeno líquido	Agua oxigenada	Solución de permanganato
Fórmula química.	CH ₃ -CH ₂ OH	O ₂	H ₂ O ₂	MnO ₄ Na (MnO ₄) ₂ Ca
Peso molecular	46,06	16	34	142 (278)
Concentración	75 % CH ₃ OH 25 % H ₂ O	—	80 % H ₂ O ₂	42,11 % Mn (38,6 % Mn)
Temperatura congelación... ..	— 117,4	— 219	— 22	— 15 (— 20)
Temperatura ebullición.	78,4	— 184	142	—
Densidad (gr/cm ³)... ..	0,789 (20°)	1,13 (— 130°)	1,3553	1,396 (1,406)
Calor latente vaporización	206	51	368	—
Calor específico (cal/Kg°C)	0,58 (100°)	0,166 (— 183°C) 0,218 (0°C) 0,223 (100°C)	0,61 (15,5°C)	—
Viscosidad (centipoises)	1,4 (20°C) 0,93 (37,8°C)	0,87 (— 219°C) 0,19 (— 184°C)	1,87 (0°C) 1,29 (18°C)	—

T A B L A II

Características de la mezcla de propulsión.

Poder calorífico	1.600 Cal/Kg.	Relación oxidante/combustible	1,31
Velocidad teórica de salida ...	3.600 m/seg.	Impulso específico real... ..	220 seg.
Velocidad real de salida	2.100 m/seg.	Peso molecular de los gases con disociación.	23,57 gr/mol.
Composición centesimal	{ 32,5 % alcohol etílico. 56,7 % oxígeno líquido. 10,8 % agua.	Coefficiente de disociación..	1,041
		$k = C_p/C_v$	1,2

T A B L A III

	Acero	Al	Si	Mg	Mn	Sb	Fe fundido	Pb	Cu	Sn
Cámara de combustión	F-3*									
Tobera	F-3									
Armaduras de turbina y bombas. Impulsores... ..		0,858	0,13	0,005	0,007					
Disco de la turbina		0,953	0,025	0,020		0,002				
Alabes de la turbina		0,957	0,015	0,015	0,013					
Bloque toberas turbina							1			
Cojinetes... ..						0,003		0,200	0,794	0,003
Eje turbina bombas	0,0040									

* Equivalente al SAE 1020, cuya composición es:

- 0,15 ÷ 0,20 C.
- 0,30 ÷ 0,60 Mn.
- 0,045 (max) P.
- 0,055 (max) Sulf.

T A B L A I V

Características de la planta motriz.

Presión en la cámara de combustión	15,6 Kg/cm ² .
Presión en la garganta de la tobera	8,41 Kg/cm ² .
Presión en el escape	0,9 Kg/cm ² .
Impulso específico medio	220 seg.
Velocidad real de los gases de escape (nivel del mar)	2.100,00 met/seg.
Volumen de la cámara	377 litros.
Temperatura de los gases en la cámara	2.600° C.
Temperatura del refrigerante	100° C.
Diámetro de la garganta de la tobera	400 mm.
Diámetro de la sección de escape de la tobera	650 mm.
Altura de adaptación de la tobera	2.000 m.
Gasto total de mezcla de propulsión	125,1 Kg/seg.
Gasto de película de refrigeración	12 % del combustible.
Calor medio	51 cal/cm ² -seg.
Relación peso/empuje	0,035.

T A B L A V

Características del mecanismo auxiliar turbo-bombas.

TURBINA

Potencia	485 cv.
Consumo de vapor	2,4 Kg/seg.
Presión de entrada del vapor	26,4 Kg/cm ² .
Presión de salida del vapor	1,75 Kg/cm ² .
Temperatura de entrada del vapor	384° C.
Tipo	2 escalones de velocidad.
Trabajo	Acción.
Velocidad del eje	3.800 r. p. m.
Diámetro del rodete	45 cm.
Número de toberas.	16.

T A B L A V I

Características del mecanismo auxiliar turbo-bombas.

BOMBAS CENTRIFUGAS	Combustible	Oxidante
Gasto	56 Kg/seg.	69,1 Kg/seg.
Presión de entrada	1,05 Kg/cm ² .	2,1 Kg/cm ² .
Presión de salida	21,8 Kg/cm ² .	17,6 Kg/cm ² .
Potencia impulsora	270 cv.	200 cv.
Velocidad del eje	3.800 r. p. m.	3.800 r. p. m.
Diámetro del impulsor	32 cm.	26,2 cm.
Número de paletas	7.	7.
Densidad del líquido	0,75 gr/cm ³ .	1,13 gr/cm ³ .