

Desarrollo de los Combustibles de Aviación

LUIS ALISTE BLANCO,
Licenciado en Ciencias Químicas
Jefe de Laboratorio (INTA)

MOTORES ALTERNATIVOS

LOS primeros vuelos controlados en un vehículo más pesado que el aire los hicieron los hermanos Orville y Wilbur Wright, con un biplano que tenía un motor de 12 hp refrigerado por agua y pesaba 90 kg. Desde un principio los ingenieros tuvieron que hacer frente al problema de la relación potencia/peso; muchas e ingeniosas fueron las ideas para aumentar esta relación. Fueron los franceses, poco antes de empezar la I Guerra Mundial, los que encontraron una buena solución con la invención del motor rotativo refrigerado por aire, con el que volaron la mayor parte de los aviones del bando aliado; sin embargo, tenía muchas limitaciones y aunque siguió empleándose después de la guerra en aviones de entrenamiento, este motor desapareció.

Siguió una generación de motores, en línea y en V, refrigerados por agua, entre los que estaban el francés de la Hispano-Suiza, el alemán de Mercedes Benz, los británicos, Aguila y Halcón, de Rolls-Royce y el americano Liberty, con potencias superiores a los rotativos. No pasó mucho tiempo hasta el desarrollo de una nueva generación de motores refrigerados por aire, tales como el Whirlwind de American Wright, el Wasp de Pratt & Whitney y el Jaguar de British Armstrong.

Entre los fabricantes se estableció una pugna por conseguir la supremacía de sus motores; para ello sirvió de estímulo el Trofeo Schneider que, por otra parte, también estimuló el desarrollo de gasolinas de mayor calidad. Fue la II Guerra Mundial la que dio un impulso decisivo al motor de aviación.

Bajo la dirección de sus diseñadores y con la ayuda de la industria petrolífera, la potencia de los motores de aviación fue aumentada en menos de cincuenta años desde el modesto motor Wright de 12 hp al impresionante motor turbo Wright R-3350 de 3.500 hp.

Combustible para Motores Alternativos

El desarrollo del motor alternativo fue posible gracias al desarrollo del combustible.

Una de las primeras dificultades que fue necesario superar fue el fenómeno de detonación que se puso de manifiesto en primer lugar en los motores de automóvil; pero no fue hasta que este problema se presentó en los motores de aviación en la I Guerra Mundial, cuando se comprobó que la composición de los crudos petrolíferos de donde se obtenía la gasolina estaba muy relacionada con la detonación.

Los crudos de diferentes zonas no son de la misma naturaleza; incluso el crudo del mismo pozo puede tener diferentes características dependiendo de los niveles de extracción. Las diferencias principales consisten en la presencia, ausencia y proporciones de hidrocarburos parafínicos, nafténicos, aromáticos y olefínicos; las posibles combinaciones de estos y otros compuestos químicos son casi infinitas.

La relación entre la naturaleza del crudo y el fenómeno de detonación se manifestó cuando los Estados Unidos, después de entrar en la guerra en 1917 enviaron a Europa gasolina de Pensilvania para suministrar a las Fuerzas Aéreas Británicas y Francesas; con ella se originó una epidemia de fallos en los motores que desaparecieron cuando se volvió al empleo de su gasolina o se le incorporaba a aquella 20% de benzol.

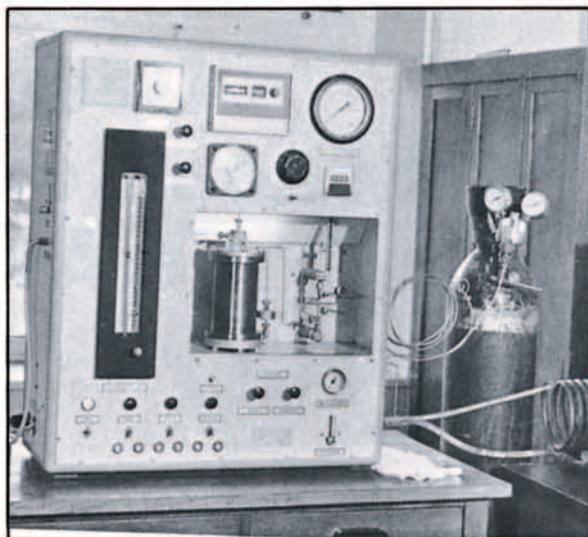
Después de la guerra, la Asiatic Petroleum Co. contrató a un ingeniero de automoción británico, Harry Ricardo (más tarde Sir Harry) para investigar la relación existente entre la detonación del motor y la naturaleza del combustible. Como resultado de este trabajo Ricardo llegó a establecer que el fenómeno de detonación era el factor más importante para definir la calidad de un combustible y que dependía de su composición química; también encontró que de los tres tipos de hidrocarburos son los parafínicos los de mayor tendencia a detonar aumentando con el peso molecular y el peso específico, disminuyendo esta tendencia con los nafténicos y con los aromáticos.

Varios fueron los diseños que Ricardo hizo para evitar la detonación en los motores que afectaban a la cabeza de los cilindros y cámara de combustión, con el fin de conseguir una turbulencia adecuada, situación de la bujía y tamaño y posición de las válvulas de admisión y escape. Otra contribución de Ricardo fue el motor monocilíndrico refrigerado por agua de relación de compresión variable de 3,7/1 a 8/1, que permitía modificar esta relación mientras el motor estaba funcionando. Con él se llegaron a establecer las propiedades antidetonantes de las gasolinas de Mayor Relación de Compresión Útil (HUCR).

Midgley y Boyd, en un trabajo patrocinado por la General Motors, estudiaron las propiedades de detonación de muchos hidrocarburos puros, encontrando que no era válido lo establecido por Ricardo respecto a los hidrocarburos parafínicos; pues había algunos, tales como el isoctano e isopentano con estructura ramificada, que



*Azufre en productos petrolíferos, por fluorescencia de Rayos X.
INTA 15 06 21.*



*Estabilidad térmica de combustible para motores de turbina.
INTA 15 06 25.*

tenían excelentes propiedades antidetonantes. Posteriormente estos investigadores centraron su trabajo en la investigación de un elemento o compuesto que, incorporado a la gasolina, mejorase sus propiedades antidetonantes. Después de ensayar 30.000 compuestos, la mayoría de naturaleza organometálica, fue el plomo tetraetilo, $Pb(C_2H_5)_4$, el que ofrecía un mejor comportamiento.

En los años 1922/23 la Armada Americana empleó gasolina con este aditivo, pero se producía un excesivo deterioro de las bujías como consecuencia de la formación de depósitos de óxido de plomo, por lo que al plomo tetraetilo se le incorporó dibromuro de etileno que actuaba como limpiador puesto que formaba bromuro de plomo volátil y evitaba la formación de óxido.

En 1927 la gasolina procedente de los crudos de California tenía fama por sus propiedades antidetonantes frente a la obtenida de los crudos de Pensilvania. Por eso Lindberg usó aquella para abastecer el motor Whirlwind J-5 del avión con el que realizó el primer vuelo transatlántico durante treinta y tres horas y media.

Basándose en la diferencia en la detonación de los dos hidrocarburos n-heptano e isooctano, Graham Edgar en 1927 los utilizó como combustibles de referencia, preparando mezclas de ambos en porcentajes diferentes; la gasolina que presentaba características de detonación semejantes a una mezcla determinada tenía un número de octano equivalente al porcentaje de isooctano de la mezcla de referencia.

Hacia 1930 el número de octano de la gasolina empleada por el Ejército Americano era 87; sin embargo la empleada por el Ejército Británico tenía 74. Había no obstante otros combustibles con un número de octano de 95-96 que se empleaban en competición; así, la preparada por F. R. Bank de Ethyl Export Corporation en colaboración con los químicos de Esso, estaba compuesta por 78% vol de benzol, 22% gasolina con un contenido de 3,3 mL de TEL por galón USA, 30% benzol, 60% metanol, 10% acetona y TEL.

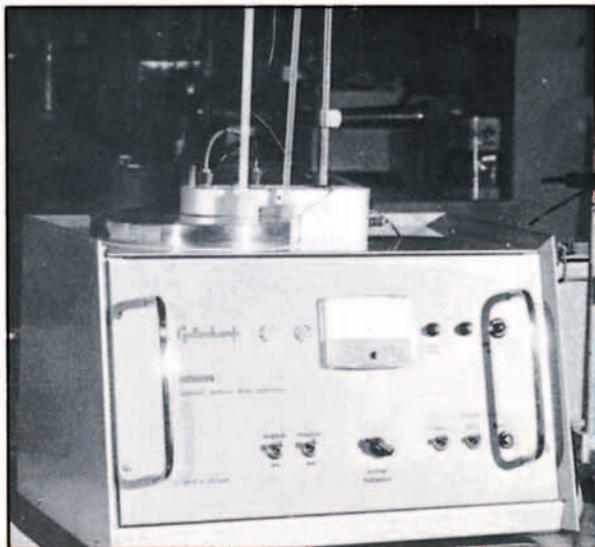
En 1920 la Standard Oil Company comenzó un intenso programa para el desarrollo de técnicas de hidrogenación a alta presión, pero fue el descubrimiento de la catálisis lo que hizo posible la producción de gasolinas de relativamente elevado número de octano a partir de querosenos y gasoils de bajo contenido en aromáticos. Este proceso marcó un hito importante en la consecución de gasolinas de alto octano, que facilitaron el desarrollo de motores de aviación de alta potencia.

Los trabajos de S. D. Heron en el US Army Air Corps. Power Plant Laboratory demostrando que un combustible de 92 octano permitía aumentar la potencia de un motor un 30-35 por ciento frente a la que proporcionaba la gasolina que se empleaba entonces de 50 a 60 octano, convenció a las autoridades y fabricantes de motores de la conveniencia de empleo de estos combustibles.

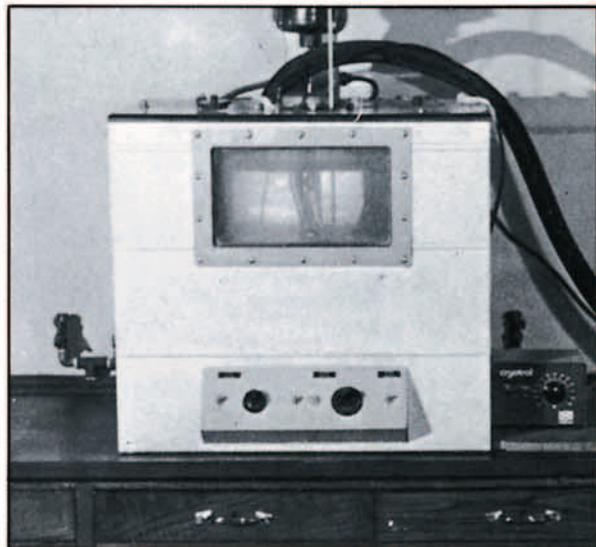
La primera especificación de un combustible de 100 octano, denominada K-3575, la publicó en febrero de 1934, el U.S. Army Corps. Desde que en enero de 1935 el capitán F.D. Klein presentó en el Instituto de Ciencias Aeronáuticas la comunicación "Comportamiento del motor de avión con combustible de 100 octano", éste fue el combustible que empleó la aviación americana y, en poco más de 10 años, llegó a ser el combustible standard de la aviación comercial. Esta gasolina contenía 50% de isooctano o mezcla de isómeros del octano con 3 mL de TEL por galón.

La solicitud de cantidades apreciables de gasolina de 100 octano, fue el estímulo que precisaban los principales fabricantes para el desarrollo de procesos de fabricación de isooctano y mezclas de otros isómeros a un coste razonable. Fue en el año 1937 cuando, utilizando el proceso de alquilación, se consiguieron los objetivos.

Cuando empezó la guerra en 1939 los aviones Hurricane y Spitfire de la RAF se encontraban en inferioridad frente a los Messerschmitt Me 109 de la Luftwaffe; esto se corrigió en parte cuando en abril de 1940 comenzó el suministro de gasolina de 100 octanos desde las refinerías americanas, con lo que se consiguió aumentar la potencia de los motores Rolls-Royce Merlin de 1.030 a 1.310 hp. Pese a ser superada en número de aviones la RAF ganó la Batalla Aérea en Inglaterra y contribuyó a evitar su invasión por las tropas alemanas. Haciendo una extrapoliación de los hechos históricos podría decirse que la gasolina cambió el curso de la historia, pues con la invasión de Inglaterra el final de la guerra quizá hubiera tenido un sentido diferente.



Calor de combustión de combustibles líquidos. INTA 15 02 29C.



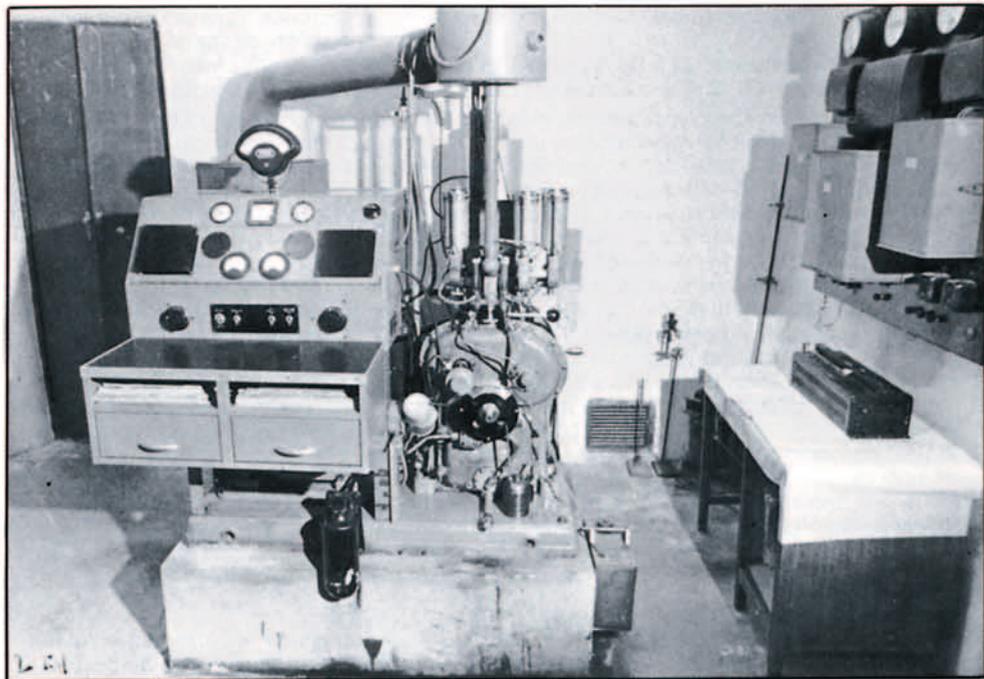
Viscosidad cinemática a baja temperatura. INTA 15 02 16B.

Cuando los Estados Unidos entraron en guerra al final de 1941, los acontecimientos habían demostrado que el poderío en el aire era de vital importancia para la victoria; fue por lo que se concedió prioridad al acero y otros materiales necesarios para la fabricación de gasolina de 100 octano a gran escala. En diciembre de 1942 la producción diaria era 5,5 millones de galones, en junio de 1943 era de 10 millones y en junio de 1945 superaba los 20 millones.

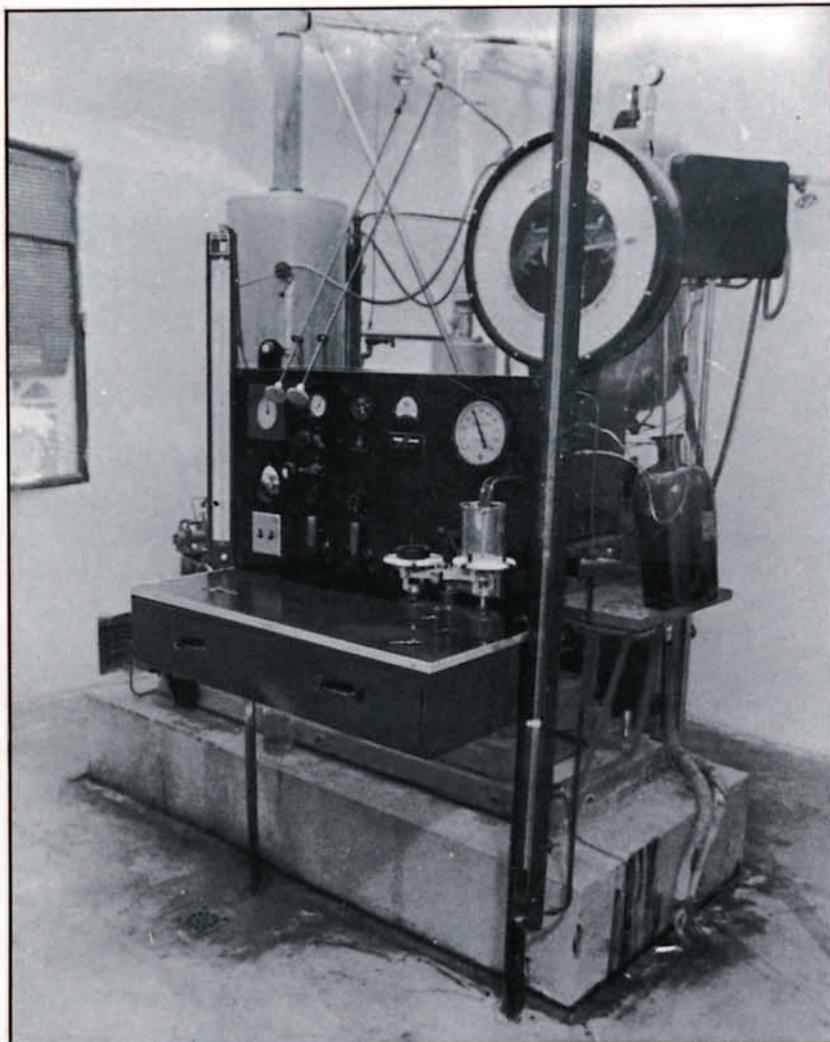
Finalizada la guerra en Europa y a punto de terminar en el Pacífico, la demanda de combustible bajó considerablemente hasta 5 millones día. En 1950 muchas de las refinerías que habían producido combustible para aviación se adaptaron a la obtención de gasolina de alto octano para su uso en motores de automoción.

Características del Combustible para Motores Alternativos

La especificación MIL-G-5572F establece tres tipos de gasolina, la 80/87, 100/130 y 115/145. Estos números corresponden a sus características antidetonantes; los iguales o inferiores a 100 se refieren al índice de octano y corresponden al porcentaje de una mezcla de isooctano y n-heptano cuya característica antidetonante es la misma que la de la gasolina. Los números iguales a 100 o superiores se refieren a índice de potencia y se valoran frente a mezclas de isooctano y diferentes proporciones de plomo tetraetilo. Su determinación se hace en motores normalizados ASTM-CFR.



Índice de octano. Método Research. ASTM D 2699.



Índice de resistencia a la detonación. Método sobrealimentado. ASTM D 909.

curva de destilación, determinando las temperaturas a las que destilan el 10%, 40%, 50%, 90% y el P. final la suma de las temperaturas correspondientes al 10% y 50%, el volumen del residuo de destilación y la pérdida.

Con el fin de controlar la pérdida de los componentes más volátiles cuando el avión alcanza altura, se limita el valor de *presión de vapor Reid*. El *peso específico* es un dato útil para determinar la carga en el avión. El *calor de combustión* es una medida del contenido energético del combustible y se determina valorando el calor liberado en la combustión de la unidad de masa al combinarse con oxígeno en una bomba calorimétrica. El *punto de cristalización* indica la temperatura más baja a la que pueden utilizarse sin solidificación de hidrocarburos que dificultarán la entrada de la gasolina al motor en condiciones adecuadas. El combustible debe conservar sus características después de largos períodos de almacenamiento y en cualquier clima; la falta de estabilidad determina la formación de productos polimerizados que se depositan como resinas sólidas o gomas en los tubos de aspiración, carburador, válvulas, etc., cuando se evapora la gasolina; su valoración se hace mediante los ensayos de *gomas actuales y potenciales*. La mayoría de los compuestos de azufre tienen un marcado efecto perjudicial sobre la eficacia del plomo tetraetilo y por ello se limita su *contenido en azufre* al 0,05% masa; por otra parte, también pueden ejercer una acción corrosiva sobre los elementos metálicos del motor que se comprueba mediante el ensayo de *corrosión a la tira de cobre*. Otro ensayo importante es el de *tolerancia al agua* cuyo propósito original fue impedir la incorporación de compuestos de alto octano solubles en agua, tales como alcoholes; consiste en la mezcla de 80 mL de combustibles con 20 mL de agua y observar el cambio de volumen y el tipo de interfase; hoy el aspecto de la interfase es lo más importante de la prueba, porque una interfase formada por una emulsión podría ser sintomático del deficiente funcionamiento posterior de los equipos de filtración y separación de agua de las instalaciones de repostamiento.

MOTORES DE TURBINA

LOS primeros estudios después de la I Guerra Mundial, basados en la tecnología de las turbinas industriales, concluyeron que el más eficaz motor de reacción generaría menos potencia por unidad de peso que un motor de pistón. Fue Frank Whittle quien demostró que esas suposiciones eran falsas; su patente de

Las características antide-tonantes varían con la relación aire/combustible. Con mezcla rica el combustible adicional actúa como refrigerante y disminuye la detonación, consiguiendo un mayor rendimiento del motor. Un motor de aviación debe proporcionar su máxima potencia en el momento de despegue utilizando una mezcla rica; el índice de potencia del combustible en estas condiciones se determina en un motor sobrealimentado según ASTM D 909. Para una velocidad económica de crucero se emplea mezcla pobre y sus características antide-tonantes se determinan según ASTM D 2700.

La gasolina 80/87 incluye un alto porcentaje de fracciones procedentes de la destilación directa del crudo; sin embargo, las 100/130 y 115/145 consisten principalmente en isoparafinas con una pequeña proporción de hidrocarburos aromáticos. Para conseguir la necesaria volatilidad se utilizan mezclas de isoocotano y de isopentano y se mejoran sus propiedades antide-tonantes con plomo tetraetilo, siendo los contenidos máximos admitidos 0,14 g Pb/L la 80/87, 0,56 g Pb/L la 100/130 y 1,28 g Pb/L la 115/145.

La volatilidad debe ser tal que el combustible pase de su estado líquido en los tanques a fase vapor en el motor en condiciones óptimas; su comprobación se hace mediante la



Indice de separación de agua de combustibles para motores de turbina (con microseparador). INTA 15 06 25.

1930, representa el primer concepto práctico de la aplicación de la turbina a la aviación; fue la base para la creación de la compañía Power Jets Ltd en Gran Bretaña en marzo de 1936 y el subsiguiente desarrollo de motores de turbina en este país y en Alemania.

Otro pionero del motor de turbina fue el alemán Hans von Ohain quien construyó el motor Heinkel S-3B que instalado en el avión Heinkel 178 hizo su primer vuelo el 27 de agosto de 1939. Sin embargo, el motor Whittle instalado en el avión Gloster E-38/39 no voló hasta el 15 de mayo de 1941.

Aunque los alemanes tenían cierta ventaja en los motores de turbina no se decidieron a dedicar una mayor parte de sus recursos a la producción de aviones de caza con estos motores hasta 1943; contribuyó a ello la falta de gasolina de 100 octanos y que el motor de turbina podía adaptarse al consumo de gasóleo. A pesar de este retraso los alemanes construyeron 5.000 motores Junkers 004B que se instalaron en los cazas Messerschmitt 262. Estos cazas entraron en servicio en 1944 y eran casi 100 mph más rápido que los Gloster Meteor británicos que se habían puesto en marcha un mes antes.

Combustible para Motores de Turbina

El desarrollo de este combustible no ha sido tan espectacular como lo fue el de la gasolina de 100 octanos.

La mayor parte de los motores de turbina de la II Guerra Mundial utilizaron queroseno normal como combustible. El gasóleo había sido considerado por Whittle pero fue elegido el queroseno debido a su bajo punto de congelación. Después del primer vuelo del Gloster Meteor se vio la conveniencia de establecer una especificación, por lo que en 1943 se publicó la RDE/KER/210 que correspondía a un queroseno de iluminación con un punto de congelación de -40°C . El año siguiente fue sustituida por la DERD-2482 que limitaba los contenidos en aromáticos (12% máximo), azufre (0,2% máximo), calor de combustión (10.270 cal/g mínimo), no consideraba el punto de inflamación y mantenía el valor del punto de congelación.

A la vista de sucesivas experiencias se hicieron modificaciones; por ejemplo, fue necesario modificar el valor del punto de cristalización, -40°C , para garantizar que no se separarían hidrocarburos sólidos en vuelos de gran altura y así surgió la especificación DERD 2494 con un punto de cristalización máximo de -50°C . Para el empleo en los portaaviones se define un queroseno menos volátil en la especificación DERD 2488, con el punto de inflamación mínimo de 60°C .

La primera especificación americana fue la AN-F-32 en 1944 que se refería al combustible JP-1 y correspondía a un queroseno con un punto de cristalización de -60°C , como el de la gasolina; como es lógico esta exigencia restringía su disponibilidad. En 1950 la marina define un queroseno de mayor punto de inflamación, el JP-5, amparado en el MIL-F-5624.

En los Estados Unidos de América se desarrollaron combustibles denominados de "corte-amplio (wide-cut)" que comprendían fracciones de destilación más amplias con objeto de evitar la dificultad de suministros en el caso de conflicto bélico. Esta forma de proceder es contraria a lo que se hizo en la II Guerra Mundial, utilizar el queroseno y reservar la gasolina para los motores de pistón; el primer combustible de este tipo fue el JP-2, amparado en la especificación AN-F-34 de 1945, que permitía una presión de vapor Reid de 14 kPa como máximo, para así aumentar la disponibilidad al incluir fracciones más pesadas.

De las experiencias obtenidas se dedujo que podía tolerarse una mayor volatilidad con lo que se facilitaría el arranque de las turbinas y surgió el JP-3, especificación AN-F-58 en 1947, que permitía una presión de vapor Reid comprendida entre 35 y 49 kPa, pero debido a problemas operativos a gran altura, formación de espumas y pérdidas de combustible, condujo a la preparación del JP-4, especificación MIL-F-5624 en 1951, siendo su equivalente británica DERD-2486.

Las especificaciones de mayor uso actualmente para combustibles de motores de turbina de uso en aviación son MIL-T-5624L que se refiere a los grados JP-4 y JP-5, MIL-T-83133A para el JP-8 y la británica DERD 2494 edición 9.

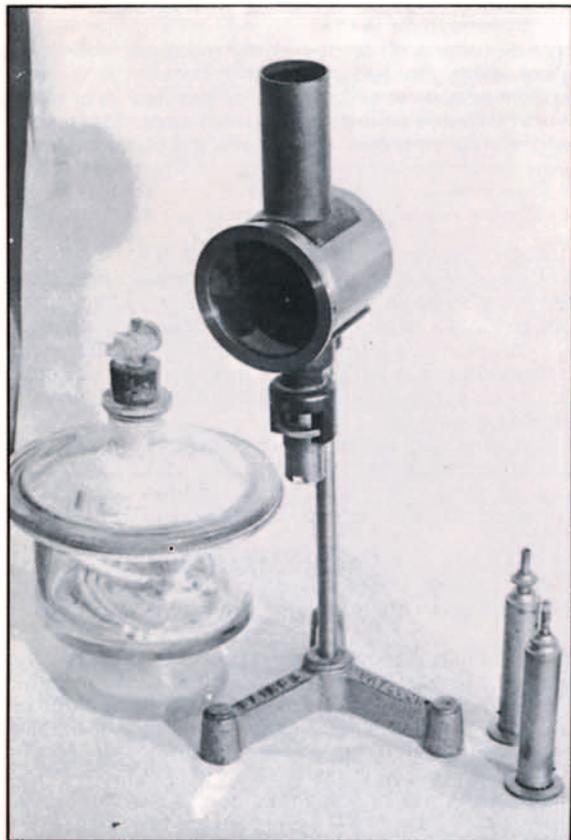
Características del Combustible para Motores de Turbina

Los combustibles de motores de turbina de aviación consisten enteramente en hidrocarburos salvo la existencia de trazas de compuestos de azufre y aditivos aprobados tales como anticongelantes inhibidores de oxidación y corrosión y disipador de la electricidad estática. Los contenidos en *aromáticos* están limitados, puesto que estos compuestos no dan una combustión tan limpia como los otros hidrocarburos, produciendo humos y depósitos carbonosos en las turbinas, aumentan la luminosidad de la llama y degradan los materiales elásticos del sistema de alimentación del combustible.

Los compuestos de azufre proceden de los crudos. La formación de óxidos de azufre en la combustión es peligrosa por el riesgo de corrosiones. Han aparecido corrosiones en ciertos modelos de turbina sobre componentes en los que figuran la plata y es por lo que se incluye además de la *corrosión al cobre* la *corrosión a la tira de plata*. Distintas impurezas se determinan mediante el ensayo de *gomas actuales y potenciales* cuyos límites son inferiores a los de las gasolinas. También se incluyen varios aditivos.

Los combustibles de turbina están sujetos a grandes cambios de temperatura y presión, por lo que es necesario controlar perfectamente sus propiedades físicas; aparte de esto, los finos orificios por donde pasa y los mecanismos de precisión del sistema de alimentación exigen que el combustible se suministre libre de agua, polvo y otras materias extrañas, para lo cual se siguen normas estrictas para el almacenamiento, manipulación y suministro; es necesario tener en cuenta la actividad microbiana que puede desarrollarse durante el almacenamiento. La *densidad* y el *calor de combustión* controlan el contenido total de energía sobre la base de peso o volumen. La volatilidad es una de las diferencias más notables entre queroseno (JP-5, JP-8 DERD 2494) y combustible de amplio corte (JP-4); se controla en el queroseno por el *punto de inflamación* y *dos puntos de la curva de destilación* mientras que en el de amplio corte, que tiene una volatilidad entre la gasolina de aviación y queroseno, se controla por la *presión de vapor Reid* y *curva de destilación*. No deben solidificarse los hidrocarburos y debe tener facilidad de bombeo, por lo que se limitan el *punto de cristalización* y la *viscosidad a baja temperatura* (-20°C). La formación de humo, depósitos de carbón y la radiación de la llama que influyen directamente sobre el funcionamiento de la turbina, viene determinado por la naturaleza de los hidrocarburos que componen el combustible; así, los parafínicos presentan una excelente combustión en contraste con la de los aromáticos, siendo los nafténicos de características intermedias y más próximas a las de las parafinas.

La calidad de la combustión se determina mediante el *contenido en aromáticos*, *punto de humo*, *contenido en naftalenos* y *número luminométrico*, que mide la radiación de la llama y su temperatura. Debido a su mayor densidad y viscosidad los combustibles de turbina son capaces de retener finas partículas sólidas y gotas de agua en suspensión durante más tiempo que las gasolinas; la presencia de ciertas impurezas afectan la tensión superficial del líquido; el ensayo de *reacción frente al agua* es el mismo que el de las gasolinas; su valoración es visual y subjetiva; es por lo que se ha desarrollado el *Índice de separación de agua* que mide, mediante una célula fotoeléctrica, la transmisión de luz del combustible. Aunque la estabilidad de los combustibles de aviación durante el almacenamiento se ha controlado por los ensayos de *gomas actuales y potenciales*, ha surgido un nuevo problema en vuelos supersónicos y a gran altura; en estas condiciones el combustible está sometido a calentamiento debido a la energía cinética que se transforma en calor y también a la utilización del propio combustible como refrigerante del aceite lubricante, fluido hidráulico e incluso del equipo de aire acondicionado. En consecuencia, el combustible debe tener una *estabilidad térmica* que permita mantener sus características por encima de 250°C sin formación de depósitos e incrustaciones que puedan afectar a la eficacia de los cambiadores de calor, filtros e inyectores. La investigación de este problema dio origen al ASTM-CFR Fuel Coker, en el que el combustible es bombeado primero a través de un precalentador que representa los intercambios de calor que sufre el combustible y después por un filtro sinterizado de acero inoxidable que representa el paso por los inyectores y finos orificios donde los productos de degradación del combustible pueden quedar retenidos. La degradación del combustible se estima en términos de pérdida de carga a través del filtro y por apreciación visual del aspecto del depósito. ■



Punto de humo de combustibles para motores de turbina.
INTA 15 06 14B.