

# CONTAMINACION ATMOSFERICA PRODUCIDA POR TURBORREACTORES Y TURBINAS DE GAS (\*)

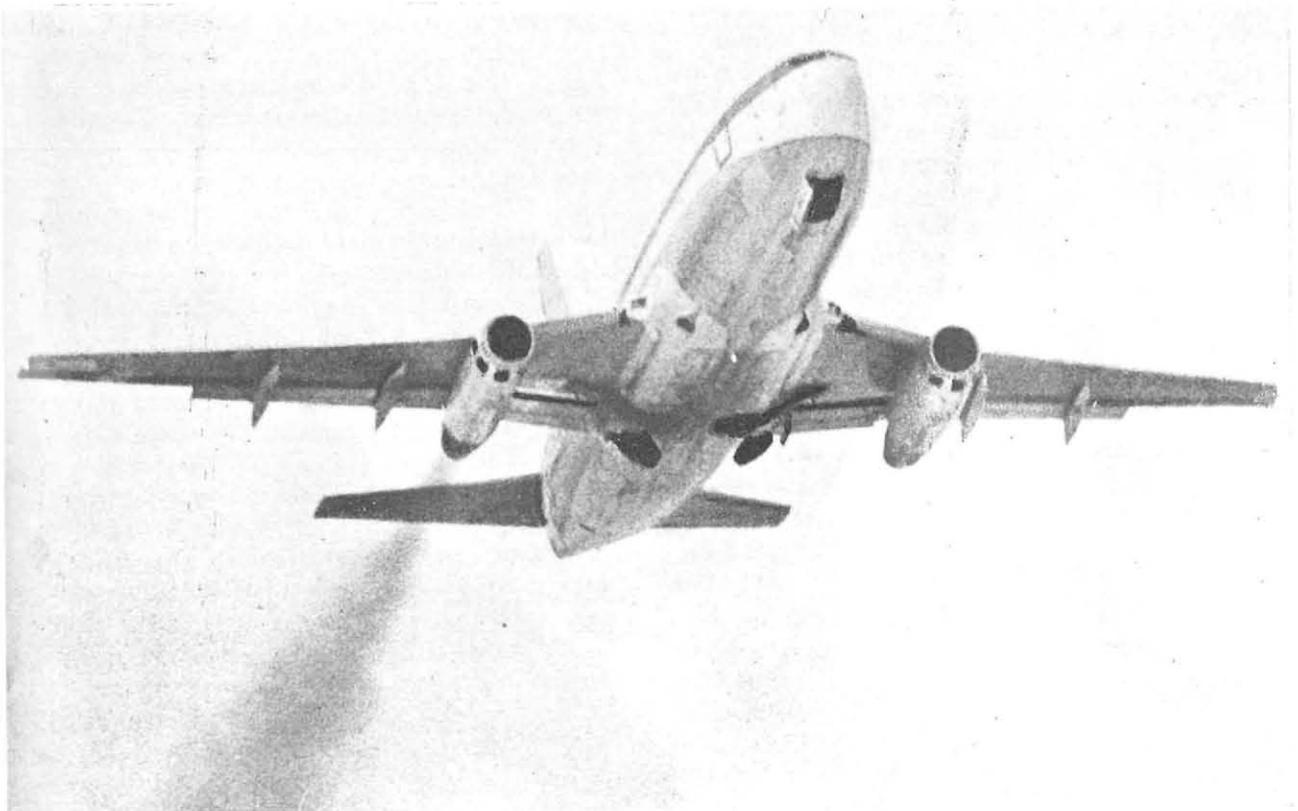
Por C. SANCHEZ TARIFA  
Dr. Ingeniero Aeronáutico.

## RESUMEN

*Se estudia en este trabajo la contaminación atmosférica producida por turborreactores y turbinas de gas en sus dos aspectos de aviación y automoción.*

*Las conclusiones más importantes son de que las principales fuentes de contaminación son las debidas a las partículas carbonosas (humo) y los óxidos de nitrógeno, y de que la primera fuente de contaminación es relativamente fácil de eliminar y muy difícil la segunda.*

Un Boeing 737 despegando con uno de sus motores Pratt & Whitney JT8D tratado para eliminar el humo y con el otro motor sin tratar.



(\*) Este trabajo fue presentado en un Coloquio organizado por el INTA, sobre "Contaminación atmosférica", en mayo de 1969.

## 1. Introducción

El problema de la contaminación atmosférica originada por turborreactores y turbinas de gas tiene dos aspectos principales:

En primer lugar, la posible contaminación producida en aeropuertos por los aviones equipados con turborreactores y turbobhélices, y en segundo lugar, la contaminación en ciudades originada por turbinas de gas industriales y, sobre todo, para automoción. Este último caso es importante, pues, aunque las turbinas de gas para automóviles y camiones aún se encuentran en fase experimental, las excelentes características que, como veremos, presentan respecto a la contaminación atmosférica pudieran constituir un factor esencial a considerar con vistas a su posible introducción comercial en competencia con el motor alternativo.

A primera vista pudiera parecer que no hay problemas de contaminación atmosférica en los aeropuertos, ya que se encuentran en zonas poco pobladas y no parece que existan problemas apreciables de contaminación; pero como se verá, esta ausencia de problemas se debe a la eficiencia actual con que queman los motores de reacción.

Esta eficiencia del proceso de combustión en cuanto a contaminación atmosférica es realmente importante, ya que los turborreactores de los aviones comerciales queman cantidades muy grandes de combustible en las proximidades de los aeropuertos. Pueden citarse, por ejemplo, que en un aeropuerto de gran tráfico pueden llegarse a quemar centenares de toneladas de hidrocarburos por hora, lo que haría el aeropuerto inutilizable por falta de visibilidad, si es que la combustión produjera cantidades importantes de humo, o haría el aeropuerto y sus zonas limítrofes inhabitables si los turborreactores produjesen cantidades importantes de contaminantes nocivos para la salud.

Estos problemas de contaminación en los aeropuertos adquieren una importancia especial en el caso de los futuros aeropuertos para aviones STOL o VTOL o de despegue corto o vertical, ya que estarán situados en el interior de las ciudades.

Las turbinas de gas funcionan con un proceso motor totalmente análogo al de los turborreactores, aunque, generalmente, con relaciones de compresión más pequeñas y con temperaturas de combustión algo más reducidas. Así, pues, sus problemas de emisión de contaminantes son completamente análogos, por lo que no exigen ningún estudio por separado.

Como se verá, es muy pequeña la contaminación atmosférica que producen, y esto es en la

actualidad un factor de la mayor importancia para impulsar su entrada en la automoción.

En el cuadro 1 se resumen los tipos de motores de reacción y turbinas de gas y sus posibles problemas específicos de contaminación atmosférica:

CUADRO N° 1

MOTORES		PROBLEMAS ESPECIFICOS	POSIBLES CONTAMINANTES
MOTORES AVIACION	TURBORREACTORES.	VISIBILIDAD EN AEROPUERTOS	CARBON (HUMO) (VISIBILIDAD Y EFECTOS CANCERIGENOS)
	TURBOHELICES	CONTAMINACION, ESPECIALMENTE EN AEROPUERTOS STOL/VTOL	OXIDO DE CARBONO (TOXICO)
TURBINAS DE GAS	TURBINAS DE GAS INDUSTRIALES	CONTAMINACION EN ZONAS	HIROCARBUROS NO QUEMADOS Y ALDEHIDOS (SMOG Y EFECTOS CANCERIGENOS)
	TURBINAS DE GAS PARA AUTOMOCION	URBANAS	OXIDOS DE NITROGENO (TOXICOS) OXIDOS DE AZUFRE (CORROSIVOS Y TOXICOS)

## 2. Producción de contaminantes

Son bien conocidos los contaminantes típicos que pueden producirse en el proceso de la combustión de hidrocarburos en aire. Son el óxido de carbono (tóxico), óxidos de azufre (tóxicos y corrosivos), óxidos de nitrógeno (tóxicos), partículas carbonosas o humo (visibilidad, suciedad, productos cancerígenos) y aldehidos e hidrocarburos no quemados (irritantes y tóxicos); siendo también conocidas las condiciones fisicoquímicas de los procesos de combustible que originan estos contaminantes.

Se describirá a continuación cómo se lleva a cabo el proceso de combustión en turborreactores y turbinas de gas, con objeto de analizar las posibles zonas o fuentes de producción de contaminantes.

Es sabido que la riqueza final de la mezcla aire-combustible en los motores de reacción, a la salida de la cámara de combustión, es muy inferior a la estequiométrica, operándose con excesos de aire comprendidos entre las tres a cuatro veces la necesaria para la combustión estricta, siendo la principal razón de este exceso de aire la necesidad de mantener los álabes de la turbina por debajo de límites prefijados de la temperatura de los gases.

Por razones de eficiencia de la combustión, especialmente a regímenes bajos, y encendido de la mezcla; así como por fenómenos de apagado en altura y condiciones de reencendido de la cámara también en altura, en el caso de los motores de aviación, es imprescindible que la combustión se realice con una cantidad de aire próxima a la este-

quíométrica. Ello obliga a separar el aire que llega a las cámaras de combustión en dos corrientes: el aire-primario, que entra directamente en la cámara de combustión y con el que principalmente se realiza el proceso de combustión, y el aire secundario, que rodea el denominado tubo de llamas (fig. 2) y que va penetrando y mezclándose poco a poco con el aire primario y gases de combustión.

Las partículas carbonosas (humo) y el óxido de carbono se forman en zonas deficientes en oxígeno, pero en las que los gases están a alta temperatura.

Una zona de esta clase existe en la parte central de la cámara próxima al inyector, en la que pudieran originarse dichos contaminantes.

Por el contrario, los hidrocarburos no quemados y aldehidos se forman también en zonas deficitarias de oxígeno, pero en las que los gases se encuentran a baja temperatura. Estas zonas solamente pueden existir en las proximidades de las paredes del tubo de llamas, que se encuentra refrigerado por el aire secundario.

Los óxidos de nitrógeno se originan en zonas de alta temperatura de combustión y con abundancia de oxígeno, tales como las indicadas en la figura.

Finalmente, los compuestos de azufre se forman en condiciones de combustión completa cuando existe azufre libre en el combustible, siendo imprescindible, por tanto, limitar la cantidad máxima del mismo. En aviación, las normas de calidad limitan estrictamente el contenido en azufre, por la que los compuestos de azufre, desde el pun-

to de vista de la contaminación, no constituyen problema alguno.

En las figuras 3 y 4 (ref. 1) se presentan datos típicos de la emisión de contaminantes en turbo-reactores y turbinas de gas, comparándolos con emisiones características de los motores típicos de automóviles, incluyéndose, también, los límites máximos que están introduciendo las autoridades federales de los Estados Unidos.

Estas figuras, así como la mayoría de los datos experimentales que se exponen en este trabajo, están tomados de unos recientes trabajos de investigación sobre la contaminación originada por los motores de reacción y turbinas de gas, llevados a cabo por la Rolls-Royce y Pratt and Whitney (referencias 1 y 2).

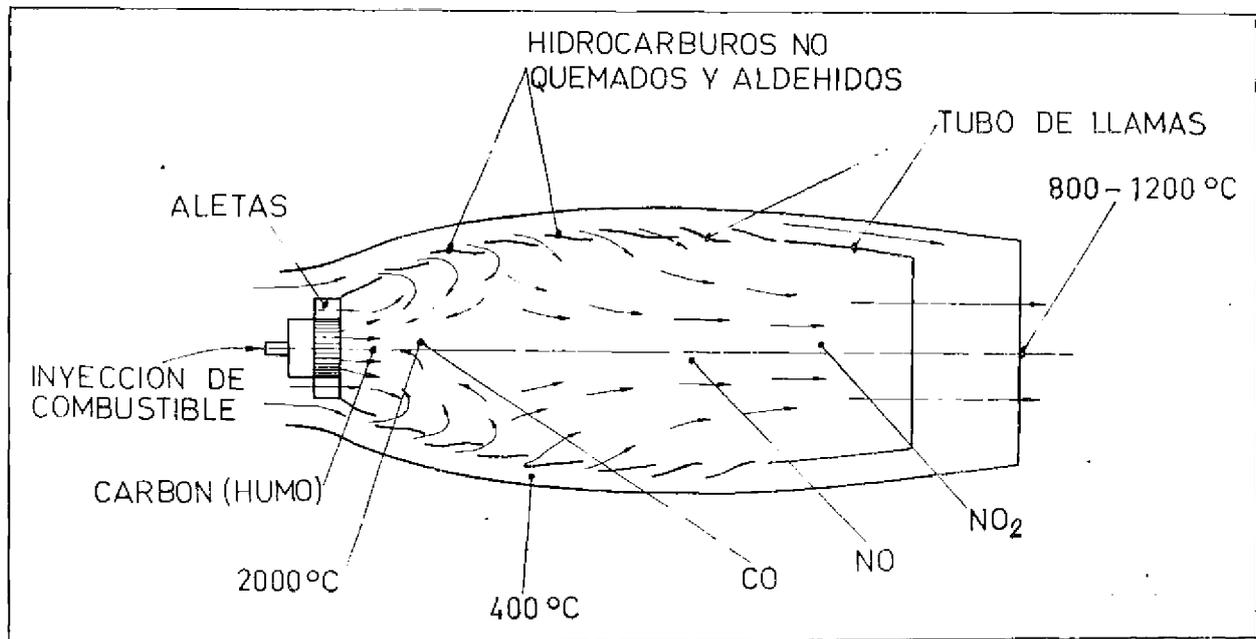
Puede verse en dichas figuras que los óxidos de carbono e hidrocarburos no quemados no constituyen problema alguno en los motores de turbina. La producción de óxidos de nitrógeno, aunque es considerablemente menor que en el caso de los motores de automóvil, hay que considerarlos a causa de su elevada toxicidad y al gran volumen de gases que expelen los motores de reacción.

Finalmente, la formación de partículas carbonosas, o humo, es un problema típico de los motores de turbina, que no existe prácticamente en los motores alternativos de gasolina de automoción.

### 3. El problema de la formación de humo en los motores de reacción

El humo se produce por la formación de peque-

Fig. 2.



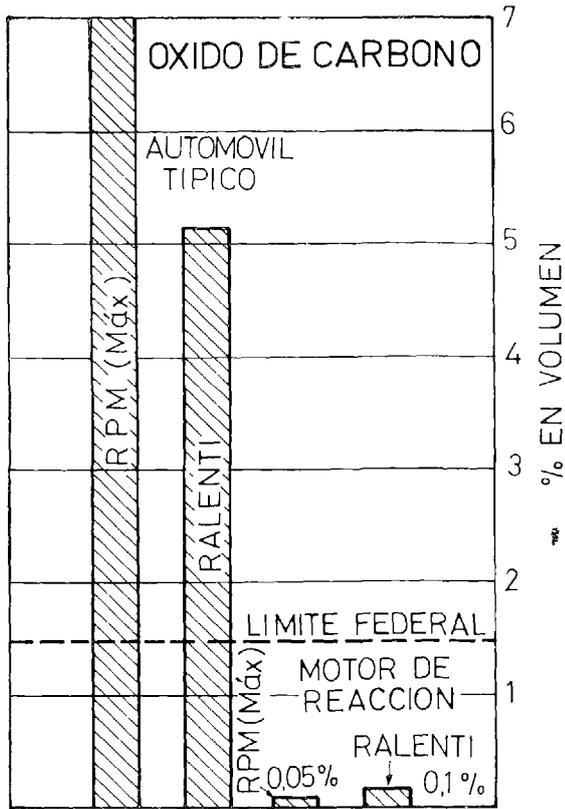


Fig. 3.

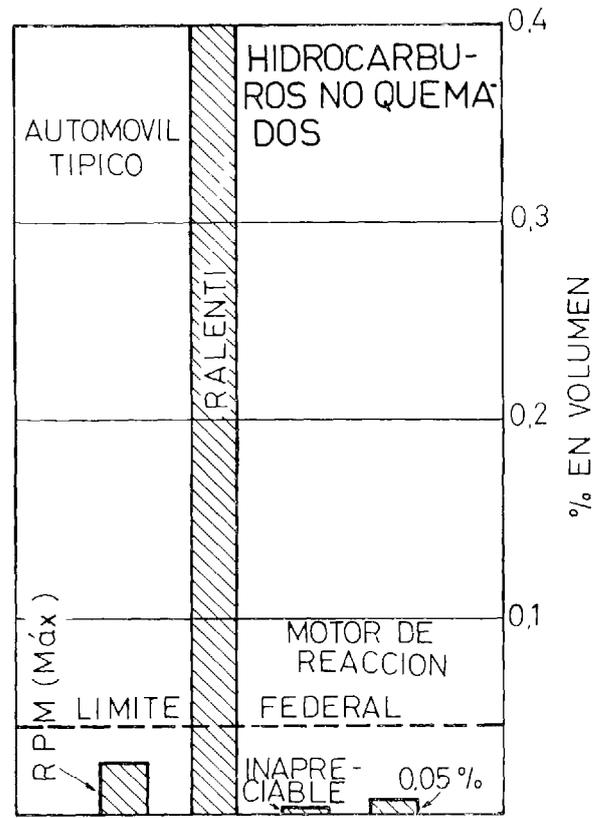
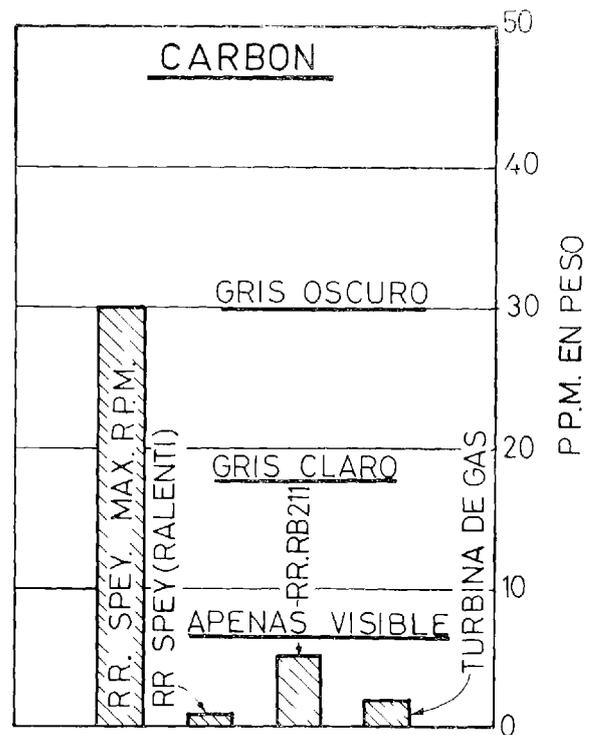
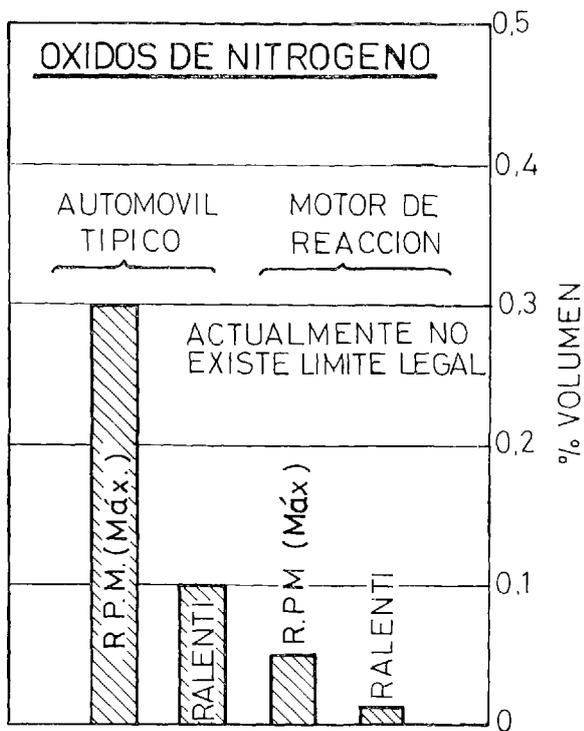


Fig. 4.



ñas partículas de carbon durante el proceso de combustion comprobando que muy pequeñas cantidades en peso de estas partículas pueden causar un humo muy denso

En el caso de los motores de turbina las partículas de carbon son de tipo muy puro no conteniendo aparte del carbon mas que en un 1 por 100 aproximadamente de hidrogeno Su diametro esta comprendido entre 10 y  $5 \times 10$  mm

El humo de los motores de turbina no contiene elementos cancerigenos tales como el benzopireno 3-4 y otras moléculas organicas que abundan en los humos de los motores Diesel y a los que precisamente debe el humo su mala reputacion

El mecanismo de la formacion de estas partículas de carbon ha sido investigado por diversos autores (refs 3 4 y 5)

Estos mecanismos no son cuantitativamente conocidos y en el caso de la inyeccion de un combustible en forma de gotas se exponen cualitativamente en el cuadro 5 (ref 1)

Se conoce que en condiciones de equilibrio solo aparece carbon cuando la riqueza de la mezcla en unas tres veces mayor que la estequiometrica No obstante en las condiciones reales de funcionamiento en la que no es probable que existan condiciones de equilibrio se forman partículas de carbon con riquezas muy poco superiores a la estequiometrica como se muestra en la figura 6 (ref 6) En esta figura puede tambien apreciarse como aumenta la formacion de carbon al crecer la relacion de compresion

A continuacion se verá como la formacion de humo es afectada por las condiciones de funciona-

miento de la camara de combustion y por los variables de diseño de la misma y que medios se emplean en la actualidad en los modernos motores de aviacion para eliminar practicamente en forma casi total esta formacion de humos

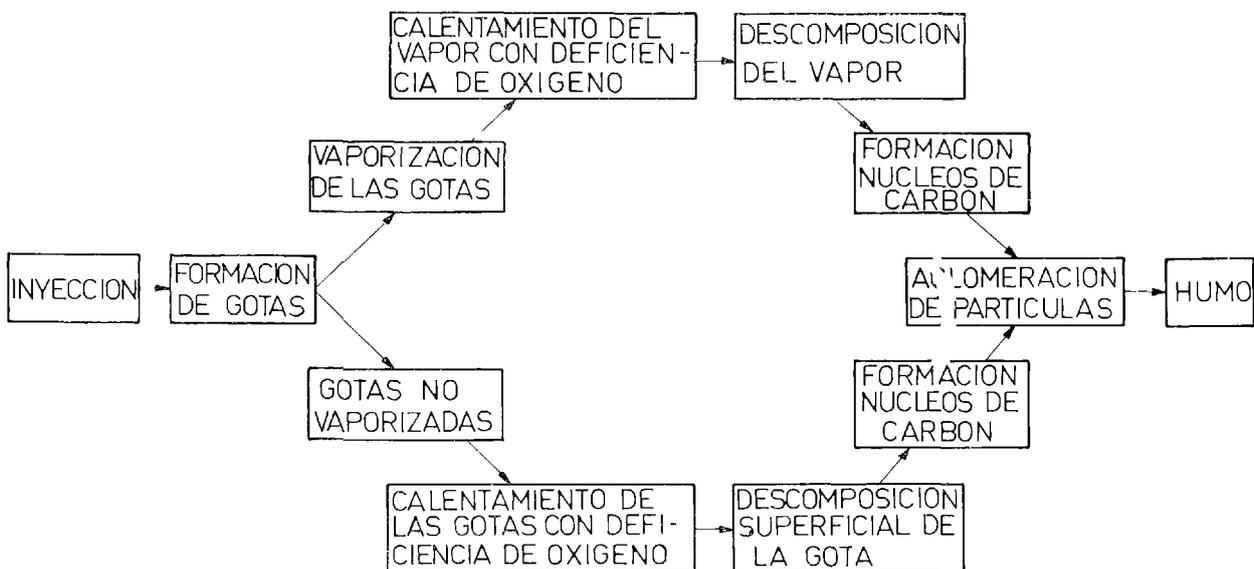
#### a) Relacion de compresion

La relacion de compresion influye en muy gran manera en la formacion de humos tanto a traves de factores fisicos como quimicos

Los factores fisicos mas importantes son la formacion de gotas y la evaporacion de las mismas A medida que la presion en la camara aumenta y si la presion de inyeccion se mantiene constante el tamaño medio de las gotas aumenta creciendo su tiempo de combustion y con el la formacion de humos A su vez el aumento de presion incrementa la temperatura de vaporizacion temperatura que es la que mantienen aproximadamente las gotas mientras arden Aumentos pues de esta temperatura de vaporizacion conducen a incrementar la vida de las gotas y con ello se incrementa la formacion de humos

Puede indicarse que si la presion en la camara llegase a alcanzar valores proximos a los criticos (unas 25 atmosferas para el keroseno) entonces estos factores producirian un efecto contrario ya que la disminucion e incluso anulacion del calor de vaporizacion y de la tension superficial de las gotas cuando estas alcanzasen su temperatura critica (unos 400) llevarian a tiempos muy cortos de combustion

Fig 5 — Mecanismo de formacion del carbon



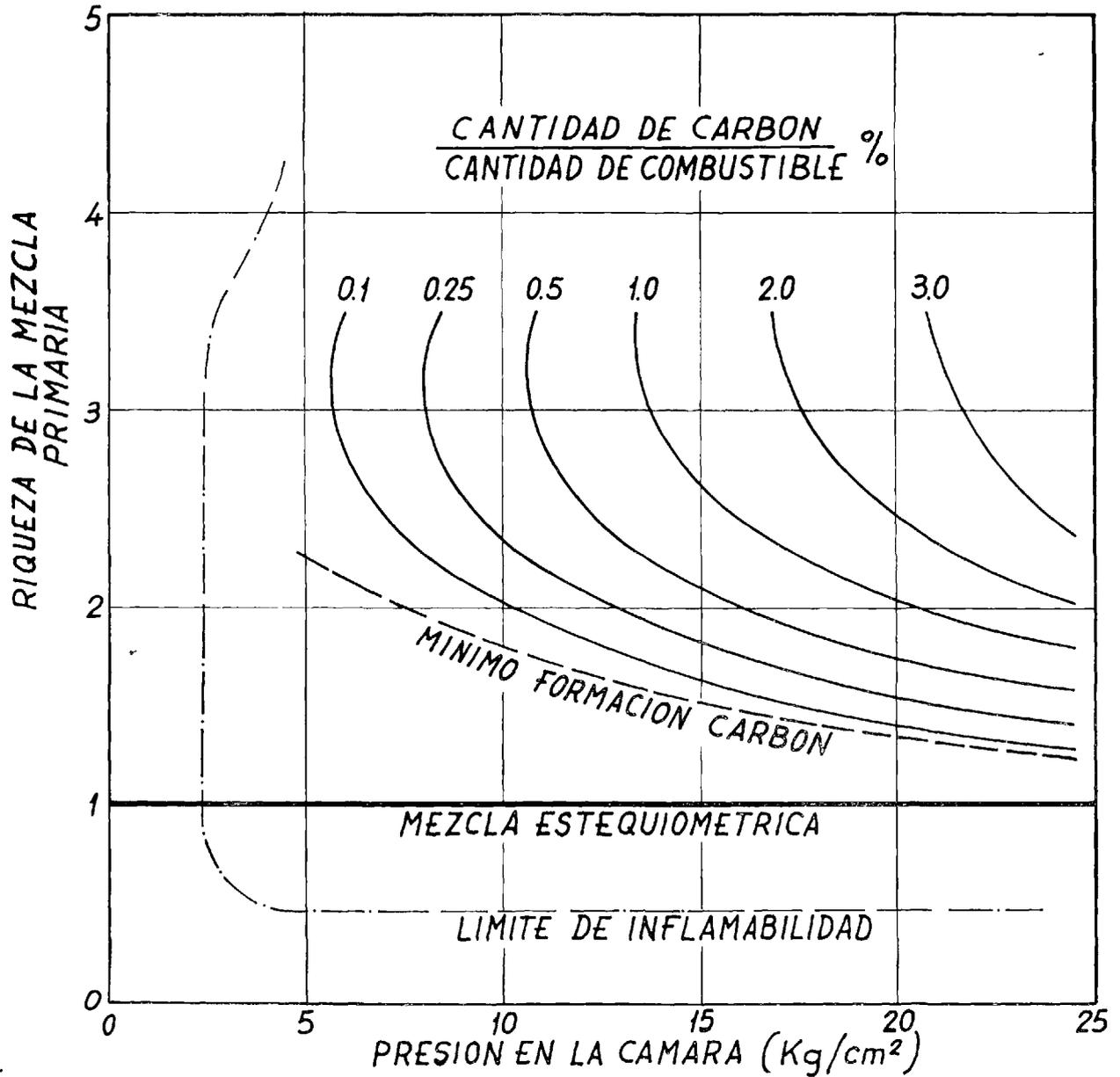


Fig 6.

Los factores químicos afectan a las reacciones de formación del carbón, que se ven favorecidas cuando la presión aumenta. En general, puede admitirse que la proporción en peso de carbón aumenta proporcionalmente a la presión elevada a una potencia del orden de tres.

En la figura 7, tomada de la referencia 2, se exponen diversos resultados experimentales sobre la influencia de la relación de compresión en la formación de humos. En ella se exponen también resultados obtenidos con motores de alta relación de compresión tratados en la forma que se verá en el párrafo siguiente.

Puede añadirse, que la formación de humos no constituye problema alguno en las turbinas de gas, ya que sus relaciones de compresión son pequeñas. Es más, solamente hasta la introducción de los modernos turboreactores de doble flujo de alta compresión es cuando el humo comenzó a constituir un problema.

#### b) Tipo de combustible

Es evidente que cambiando el tipo de combustible puede evitarse la formación de humos. Combustibles ricos en hidrógeno, tales como el metano

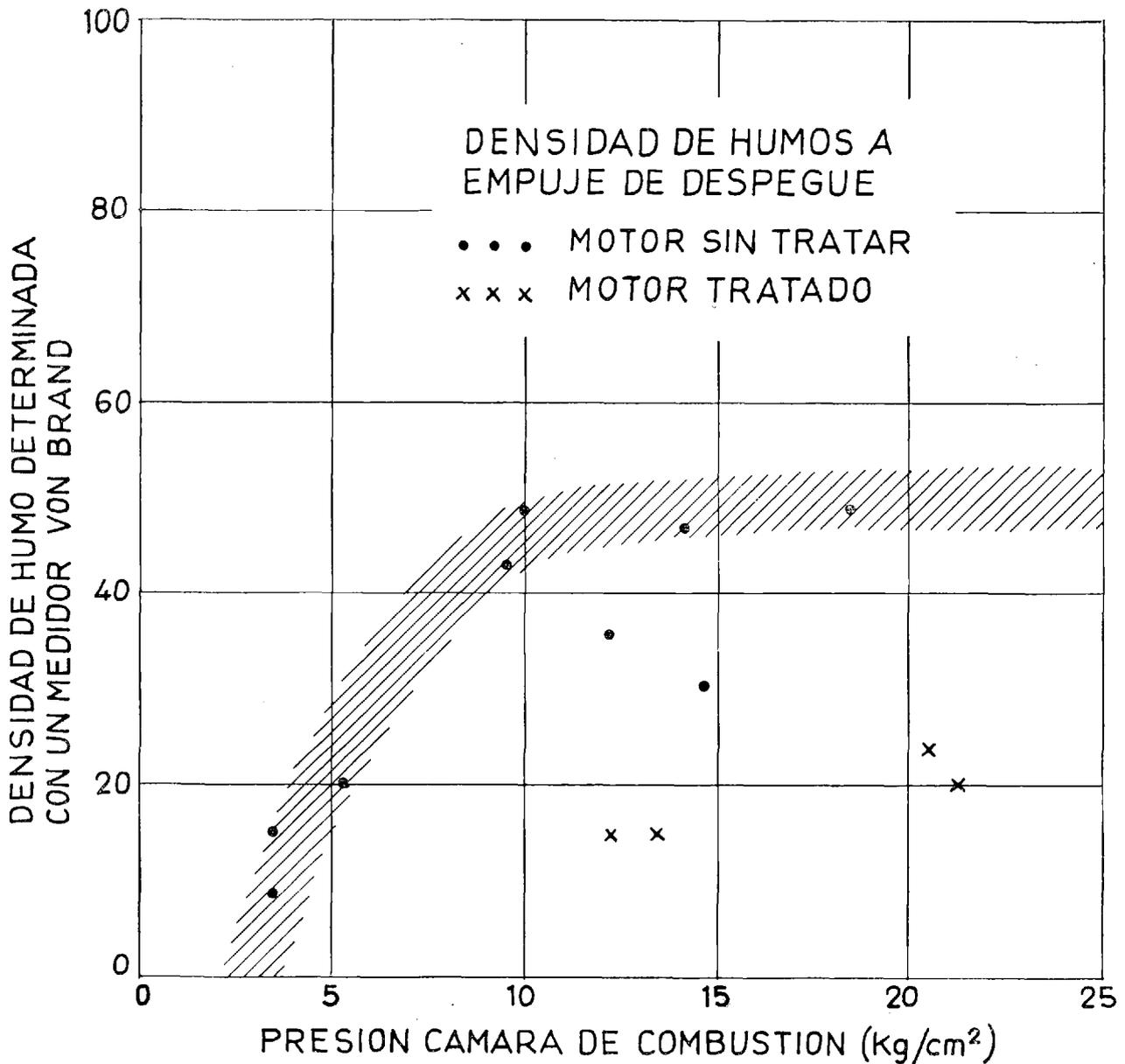


Fig. 7.

y el propano no ocasionarían problemas en cuanto a formación de humos. El propano es un posible futuro combustible para turbinas de gas y, en cuanto al metano, que es el principal componente del gas natural, es muy posible que sea el combustible de futuro para los aviones supersónicos.

También se disminuye la formación de humos utilizando combustibles incluso más densos que los kerosenos actuales, pero estando constituidos, principalmente, por hidrocarburos parafínicos, con solamente pequeñas cantidades de combustibles aromáticos, olefinas y naftalenos, pero su coste sería prohibitivo.

#### 4. Métodos para reducir la formación de humos

Independientemente de la relación de compresión, cuyos altos valores son necesarios para reducir el consumo específico de los motores y del tipo de combustible, se han llevado a cabo por las principales casas constructoras de motores (Rolls-Royce, Pratt and Whitney y General Electric) extensos programas de investigación sobre condiciones funcionales y configuración de las cámaras, con objeto de reducir drásticamente la formación de humos.

El resultado de estos programas es que la nueva generación de motores: RB-211, JTD-9 y CF-6

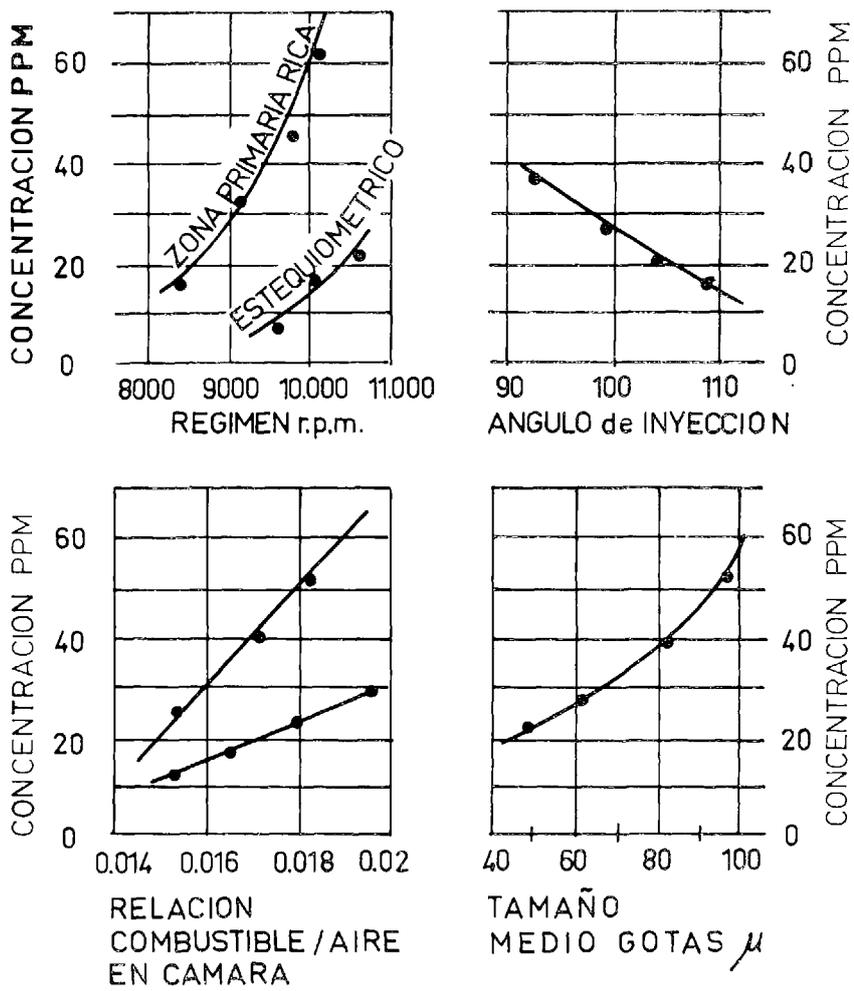
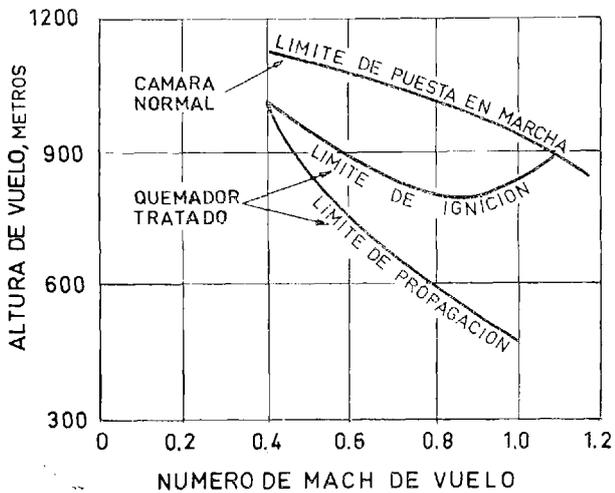


Fig. 8.

Fig. 9.



de dichas casas estarán prácticamente libres de formación de humos.

Estas investigaciones se han centrado en el diseño de la cámara, especialmente en su zona primaria y en la inyección. Se ha comprobado que aumentando la presión de inyección del combustible o aumentando el ángulo del cono de eyección del líquido, se disminuye el tamaño medio de las gotas, y con ello, la formación de humos, mostrándose la influencia de éstas y otras variables en la figura 8.

Las mejoras más importantes se consiguen aumentando la cantidad de aire en la zona primaria, pero esto conduce a mayores pérdidas de presión en la cámara, y sobre todo a problemas de estabilidad de la combustión a grandes alturas de vuelo y a dificultades en el reencendido de las mismas, también en altura, tal como se muestra en la figura 9.

La auténtica solución del problema se ha encontrado mezclando una pequeña cantidad de aire con

el combustible inyectado (Airspray de la Rolls-Royce), o bien, mediante la inyección directa de aire alrededor de la zona de inyección de combustible a través de tubos direccionales (Pratt and Whitney), y limitando la riqueza de la zona primaria a valores no inferiores a los estequiométricos.

Este tratamiento ha conducido a que en los nuevos motores (RB-211, JTD-9 y CF-6) y en los antiguos tratados (RR-Tyne, RR-Spey, JTD-8, por ejemplo), la producción de humo se haya reducido a menos de la quinta parte, dejando de constituir un problema en todos los modernos motores de reacción.

### 5. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno se forman por la oxidación a elevada temperatura del nitrógeno.

En teoría, un gran número de óxidos de nitrógeno pueden formarse, pero la pequeñez de las constantes de equilibrio de sus respectivas reacciones (figura 10) hacen que en la práctica solamente se formen cantidades apreciables de NO y NO<sub>2</sub>. Estos óxidos se forman en las zonas de alta temperatura de la cámara, por encima de unos 1.500° C., tales como las indicadas en la figura 2. Aunque en un motor de reacción la proporción de óxidos de nitrógeno es solamente del orden del 10 por 100 de los motores alternativos, la gran toxicidad de los mismos y el gran volumen de gases eyectados por dichos motores hacen que el problema sea importante.

No existe, por ahora, medio alguno para prevenir la formación de los mismos, por lo que no se ha establecido límite legal para el valor máximo de emisión de óxidos de nitrógeno en automóviles. No obstante, existen posibilidades.

Si se calculan las composiciones de equilibrio del NO y NO<sub>2</sub> en función de las condiciones existentes en la combustión, tal como se indica en la figura 11 (ref. 1), resultan proporciones muy altas, mucho mayores que las medidas experimentalmente, tal como también se indica en la citada figura.

Ello se debe a que la cinética química de las reacciones de formación NO y NO<sub>2</sub> da lugar a velocidades de formación lentas, es decir, a tiempos característicos altos, que son grandes comparados con los tiempos de residencia de las partículas de la mezcla N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> en la cámara.

Esta marca un claro camino para investigaciones futuras mediante el diseño de las cámaras que en la zona de alta temperatura los tiempos de residencia sean pequeños. De esta manera parece posible que pueda disminuirse la formación de óxidos

REACCION	CONSTANTES DE EQUILIBRIO	MOLES DE OXIDOS DE NITROGENO
$N_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons N_2O$	$1,37 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$
$\frac{1}{2} N_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons NO$	$5,90 \times 10^{-2}$	1,0
$N_2 + \frac{3}{2} O_2 \rightleftharpoons N_2O_3$	$1,21 \times 10^{-14}$	$1,4 \times 10^{-12}$
$\frac{1}{2} N_2 + O_2 \rightleftharpoons NO_2$	$2,84 \times 10^{-5}$	$5,1 \times 10^{-4}$
$N_2 + O_2 \rightleftharpoons N_2O_4$	$2,92 \times 10^{-19}$	$3,3 \times 10^{-17}$
$N_2 + \frac{5}{2} O_2 \rightleftharpoons N_2O_5$	$< 5 \times 10^{-20}$	$< 5,7 \times 10^{-10}$

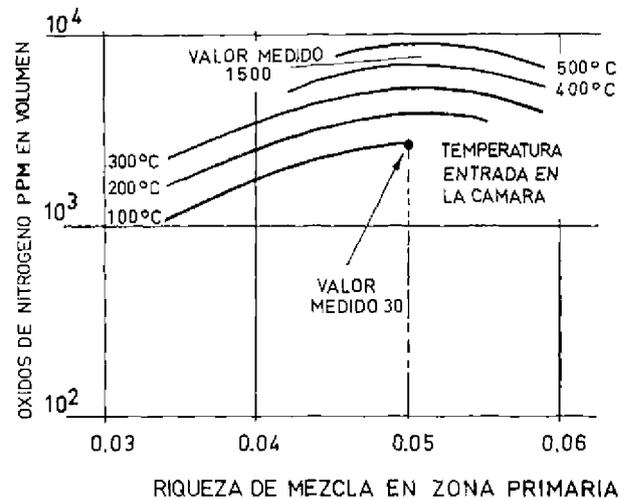
Fig. 10. - Formación de los óxidos de nitrógeno.

de nitrógeno en los motores de reacción, pero para el caso de los motores alternativos el problema parece de solución mucho más difícil.

\* \* \*

Finalmente, no queremos terminar estas líneas sin dejar de citar la turbina de vapor o motor de combustión anticontaminante, destinado a la automoción, cuyos primeros programas de investigación y desarrollo acaban de iniciarse en los Estados Unidos.

Fig. 11.



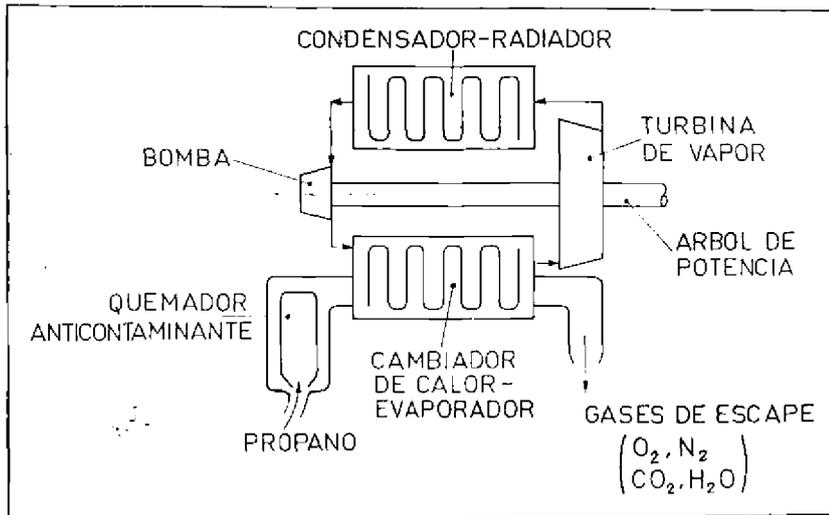


Fig. 12. — Motor de turbina de vapor con quemador independiente.

Un esquema de un motor de esta clase se muestra en la figura 12.

El proceso de combustión se separa del ciclo de potencia. De esta manera el quemador puede diseñarse orientado específicamente a reducir la contaminación, utilizándose también un combustible ligero, tal como el propano.

El ciclo de potencia se efectúa en ciclo cerrado de Rankine, con lo que podrían conseguirse motores de poco peso y buen rendimiento, e incluso los

primeros estudios están mostrando que podrían conseguir buenas características de aceleración.

Las tecnologías de los motores de combustión, alternativos o turbinas de gas, han de atender cada vez más al factor esencial de la contaminación atmosférica. Está muy próximo el tiempo en el que este factor será mucho más importante que el coste del motor o el consumo específico del combustible, ya que la humanidad no puede seguir por el camino de continuar deteriorando el medio ambiente en que vive.

## BIBLIOGRAFIA

1. DURRANT, T.: "Atmospheric Pollution by Gas Turbine Engines". *Rolls-Royce Journal*, 1968.
2. FAITANI, J. J.: "Smoke Redaction in Jet Engines through Burner Design". Pratt and Whitney. *Esso Air World*, sept.-oct. 1968.
3. SCHALLA, R. L., e HIBBARD, R. R.: "Smoke and Coke Formation in the Combustion of Hydrocarbon-Air Mixtures". *Report NACA*, 1300, 1957.
4. WHELAN, P. F.: "The Mechanism of Carbon Formation in Combustion". *The Inst. of Mech. Eng.*, 1961.
5. THOMAS, A.: *Carbon Formation in Flames*. Shell Research Ltd., 1962.
6. MCFARLANE, J. J.; HOLDERNES, F. M., y WITTCHER, F. S. E.: "Soot Formation Rates in Premixed C<sub>3</sub> and C<sub>6</sub> Hydrocarbon Flames at Process up to 20 atm.". *Combustion and Flame*, sept. 1964.