VIII.- CONTAMINACIÓN POR TURBINAS DE AVIACIÓN

pfernandezdiez.es

Los turborreactores lanzan a la atmósfera, principalmente, tres tipos de compuestos químicos:

- *Compuestos del aire ambiente: N_2, O_2 y Ar*
- *Productos de combustión completa: CO_2 y H_2O*
- *Contaminantes, como inquemados: CO, CH y humos, y otros como los NO_x*

La reacción química global se puede expresar en la forma general siguiente:

$$C_m H_n + G\,(a\,N_2 + b\,O_2 + c\,Ar + d\,CO_2 + e\,H_2O) \rightarrow$$
$$\rightarrow x_1\,N_2 + x_2\,O_2 + x_3\,Ar + x_4\,CO_4 + x_5\,H_2O + x_6\,CO + x_7\,C_x H_y + x_8\,NO + x_9\,NO_2$$

Las concentraciones de cada contaminante emitido dependen tanto de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión, como de la tecnología utilizada.

$$\textit{Contaminación nivel (OACI):} \begin{cases} HC \rightarrow 19{,}6\ g/kN \\ CO \rightarrow 118\ g/kN \\ NO_x \rightarrow 108\ g/kN \end{cases}$$

VIII.1.- FORMACIÓN DE CONTAMINANTES

CO e hidrocarburos no quemados HC.- Son productos intermedios de la combustión del carburante, cuya oxidación completa da lugar al CO_2. Las reacciones de oxidación dependen de la presión, temperaturas locales, riquezas locales de la mezcla y tiempo de permanencia.

La influencia de las condiciones termodinámicas sobre los niveles de *CO* e hidrocarburos no quemados se puede evaluar, por ejemplo, a partir del *parámetro de carga aerodinámica W*, Fig VIII.1 y VIII.2, que permite observar la influencia de la presión de entrada p_e, temperatura de entrada T_e, gasto másico de aire G_{aire} y volumen de la cámara de combustión $V_{c.c.}$.

A partir de estas curvas se puede predecir, durante la fase de dimensionamiento de la cámara, los niveles de contaminación debidos a los inquemados emitidos por el motor en todos los regímenes de funcionamiento. Se observa que dichos contaminantes se producen sobre todo en el funcionamiento al ralentí.

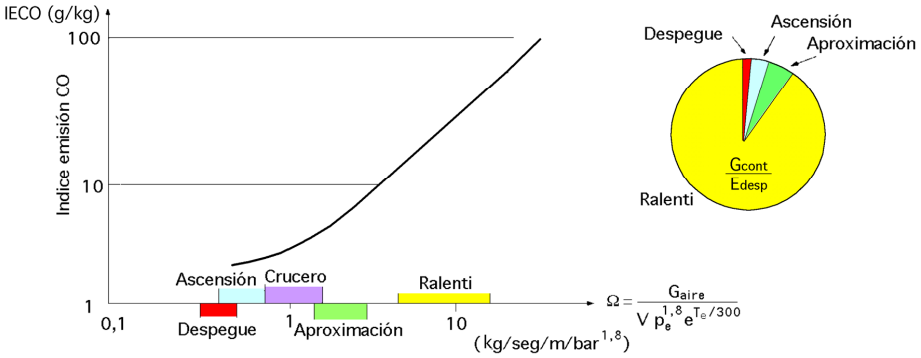

Fig VIII.1.- Influencia de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del CO (IECO)

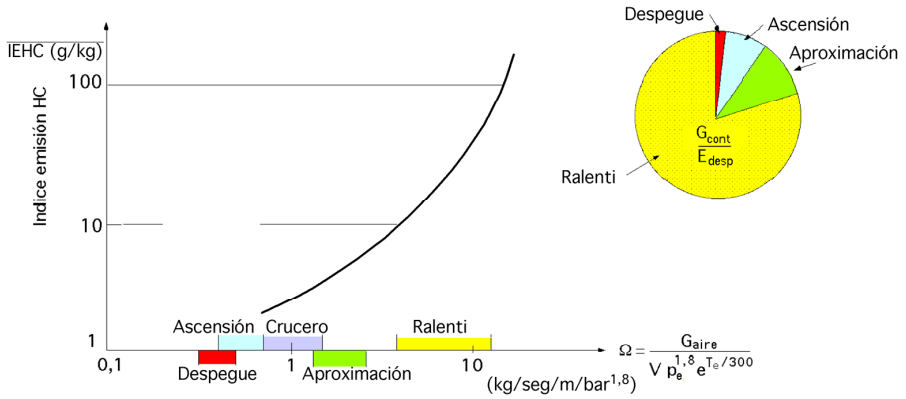

Fig VIII. 2.- Influencia de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión sobre el índice de emisión de hidrocarburos no quemados (IECH)

No se tienen en cuenta en el parámetro de carga aerodinámica,

- Las características de la carburación

- El reparto de aire en la camisa interior

- Fenómenos tales como el enfriamiento por el aire de $\begin{cases} refrigeración\ de\ las\ paredes \\ dilución\ (aire_{terciario}) \end{cases}$ *, que influyen en la producción de inquemados*

Parámetro de contaminación: $\dfrac{G_{cont}}{E_{desp}} = \dfrac{Masa\ de\ contaminante\ emitida\ durante\ el\ ciclo\ aterrizaje\text{-}despegue}{Empuje\ de\ despegue}\ \dfrac{g}{kN}$

Óxidos de nitrógeno.- Se forman esencialmente en las zonas de alta temperatura. En las condiciones de funcionamiento de un turborreactor, las reacciones de oxidación son más lentas que las de combustión del carburante por lo que las concentraciones resultantes están lejos del equilibrio químico, siendo prácticamente proporcionales al tiempo de permanencia.

Para predecir la influencia de las condiciones termodinámicas sobre los niveles de dichos óxidos se utiliza un parámetro σ, Fig VIII.3, que se obtiene a partir de resultados experimentales, y que permite deducir la influencia de la presión p_e, la temperatura de entrada T_e y el gasto másico de aire G_{aire} (o tiempo de permanencia).

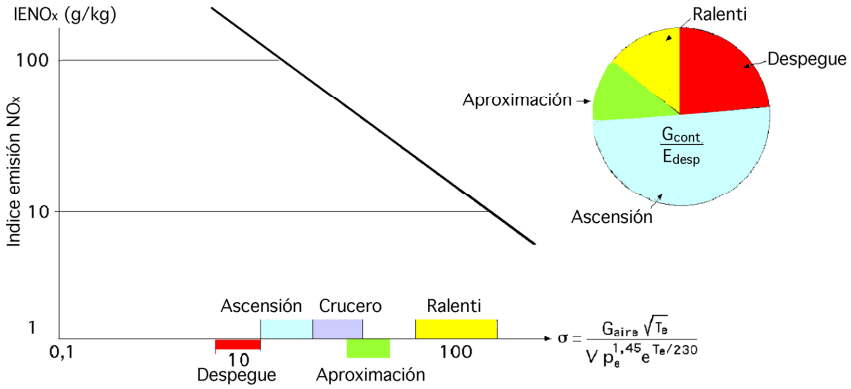

Fig VIII.3.- Influencia de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión sobre el índice de emisión del NO_x($IENO_x$)

Se observa que los NO_x se producen, sobre todo, en condiciones de gran carga, como son las fases de *vuelo ascendente* y *despegue* en las que se emite aproximadamente 3/4 partes de la masa total de NO_x. La riqueza de funcionamiento de la cámara de combustión es otro parámetro del que dependen las emisiones contaminantes; teniendo en cuenta la complejidad interna del tubo de combustión, las riquezas y temperaturas locales de la mezcla que se realiza en la zona primaria son las que controlan los procesos químicos; si se mejora la mezcla o se hace una premezcla, se puede reducir el nivel de los NO_x emitidos.

Humos.- Los humos son inquemados producidos en condiciones de AP, en zonas de la cámara en las que la riqueza local es elevada, principalmente en la zona primaria. Por el contrario, en la zona de dilución (terciaria), debido a $\begin{cases} \textit{la oxigenación de los gases} \\ \textit{que las temperaturas son todavía elevadas} \end{cases}$ se observa, en general, una combustión de las partículas de carbono y, por lo tanto, una disminución de los humos.

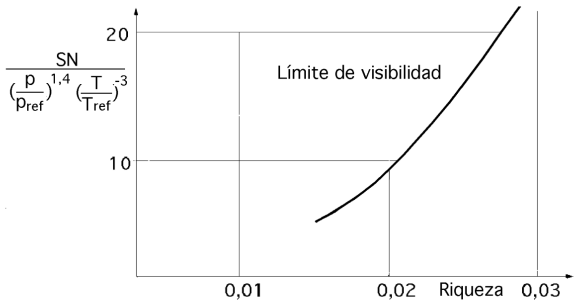

Fig VIII.4.- Influencia de las condiciones de funcionamiento de la cámara de combustión sobre la emisión de humos

El nivel de humos emitidos por un turborreactor:

- *Aumenta con la presión y con la riqueza de funcionamiento de la cámara de combustión*

- *Disminuye con la temperatura en la zona de dilución, en donde existe menor temperatura y aire$_{terciario}$ fresco, Fig VIII.4; el fenómeno de combustión de los humos en la zona de dilución, en general, supera a su producción en la zona primaria*

VIII.2.- IMPACTO DEL DIMENSIONAMIENTO DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN SOBRE LA CONTAMINACIÓN

Los niveles de contaminación de una turbina se pueden prever si se conoce la tecnología de la cámara. Para su determinación se han establecido algunas metodologías, habiéndose observado una buena similitud entre los valores calculados y las medidas realizadas a la salida de la cámara de combustión, permitiendo establecer la influencia de algunos parámetros, como el reparto de aire y carburante en la cámara, así como las características del sistema de inyección (tamaño y dispersión de las gotitas).

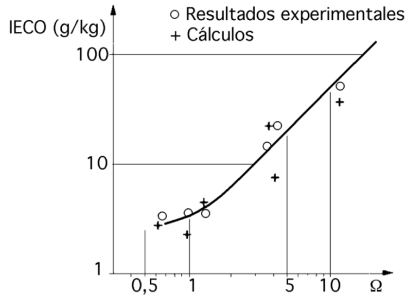

Fig VIII.5.- Comparación de los índices de CO calculados y medidos

Como no se pueden tener presentes al mismo tiempo todos los parámetros termodinámicos, hay que establecer entre ellos algún tipo de compromiso, ya que se ha observado que las condiciones de funcionamiento del motor pueden conducir a situaciones contradictorias; por ejemplo, un aumento del volumen de la cámara de combustión, produce un aumento del tiempo de permanencia, lo que provoca:

- *Una disminución de los niveles de inquemados durante el funcionamiento al ralentí*
- *Un aumento de los NO_x durante los períodos más revolucionados*

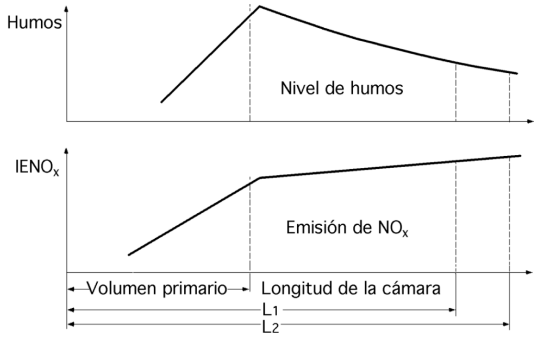

Fig VIII.6.- Influencia de la longitud de la cámara

Para una mismas condiciones iniciales, al acortamiento de la cámara de combustión reduce la emisión de NO_x lo que puede dar lugar a niveles de humos más elevados, Fig VIII.6.

Las consideraciones a tener en cuenta para eliminar la contaminación a nivel del dimensionamiento de la cámara de combustión de un motor, entran en competencia con otras prestaciones como, pérdidas de carga, temperatura de las paredes, encendido, reencendido en vuelo, estabilidad, distribución de las temperaturas de salida, etc, por lo que las opciones tecnológicas se deben seleccionar teniendo en cuenta el conjunto de las prestaciones y las condiciones de funcionamiento del motor.

VIII.3.- REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

Las turbinas de aviación están sujetas a las normas internacionales (OACI) en las que se definen los límites recomendados para los diferentes contaminantes. Los NO_x son los gases de combustión que crean el mayor problema ya que, aunque los niveles de inquemados *CO* e hidrocarburos *HC*, han disminuido de forma importante en las últimas generaciones de turbinas, no ocurre lo mismo con los NO_x. Los avances realizados en el campo de la combustión y, sobre todo, en el acor-

tamiento de las cámaras de combustión, permiten evitar que un aumento de la relación de compresión en las turbinas, incremente la producción de NO_x. Si para una misma tecnología de la cámara, la relación de compresión de las turbinas futuras siguen aumentando, los NO_x van a aumentar también, y será más difícil cumplir la normativa actual, Fig VIII.7. El acortamiento de las cámaras y los avances en la combustión contribuyen a que el aumento de la relación de compresión suponga un mayor aumento de NO_x.

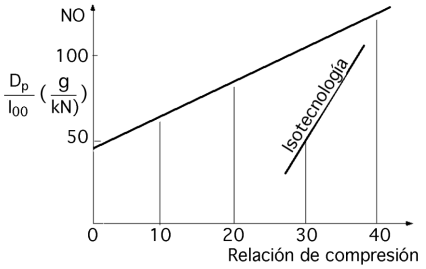

Fig VIII.7.- Influencia de la relación de compresión sobre la emisión de NO_x

Un problema adicional, en el caso de los aviones supersónicos civiles es el de la contaminación en altura, y la influencia de los NO_x en la destrucción de la capa de ozono, siendo estos contaminantes los que, actualmente, exigen un mayor esfuerzo a los proyectistas de este tipo de motores.

VIII.4.- ALGUNAS TECNOLOGÍAS UTILIZADAS PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN

Inyección de agua o de vapor.- El nivel de los NO_x se puede reducir disminuyendo las temperaturas locales de la llama, por ejemplo, inyectando agua o vapor de agua en la cámara de combustión. Se ha comprobado que en las turbinas industriales THM, una inyección de agua equivalente al gasto másico de carburante:

$$\frac{Caudal\ de\ agua}{Caudal\ de\ carburante} = \frac{1\ litro}{100_{\,x}\ \frac{1000}{1,293}\ litros} = \frac{1}{77300}\ \frac{litro}{litro}$$

puede disminuir hasta cuatro veces los niveles de NO_x, Fig VIII.8; esta solución es difícil de aplicar en las turbinas de aviones.

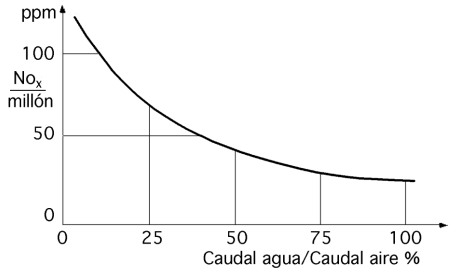

Fig VIII.8.- Influencia de la inyección de agua en una cámara de combustión THM

Inyección de amoníaco.- Otra solución consiste en intentar eliminar los NO_x mediante inyección de un agente reductor, por ejemplo, amoníaco; ésto implica:

- Un dispositivo de detección del contenido de NO_x en los gases de escape

- Un sistema de regulación que dosifique el gasto másico del agente reductor NH_3 que se debe inyectar

- Una cámara de reacción de volumen suficiente como para permitir se produzcan las reacciones químicas del NO_x con el NH_3, solución que resulta poco adaptable a las turbinas de aviación

Cambio de carburante.- Las turbinas industriales se proyectan para ser utilizadas con diferentes carburantes (gasóleo, gas natural, gas pobre, alcohol, etc). La experiencia demuestra que, debido a que la temperatura de la llama es más baja, los carburantes con un poder calorífico débil dan

lugar, para un mismo diseño de la cámara de combustión, a niveles de NO_x más bajos y a niveles de CO e hidrocarburos no quemados más altos.

La utilización de carburantes de bajo poder calorífico da lugar a consumos específicos mayores, necesitando, una mayor cantidad de carburante para un mismo cometido.

Estas soluciones, aplicables a las turbinas industriales de gas, lo son difícilmente a las turbinas de aviación, ya que dan lugar a un mayor consumo.

Mejora del sistema de inyección.- La mejora de los sistemas de inyección disminuye los CH por cuanto los niveles de contaminación emitidos dependen mucho del rendimiento del sistema de inyección.

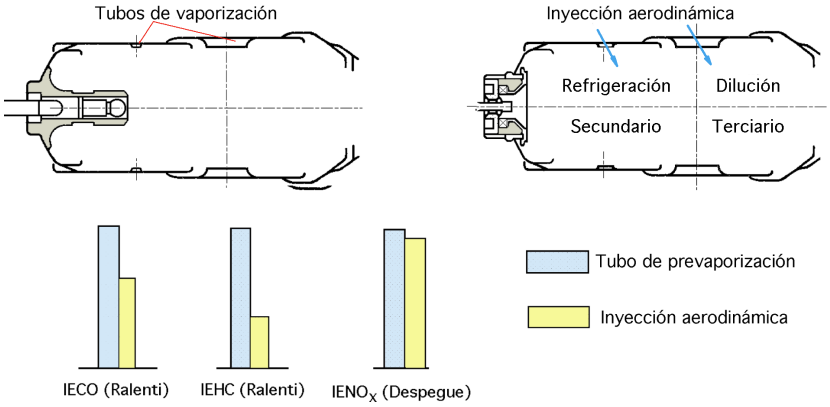

Fig VIII.9.- Mejora del sistema de inyección

La calidad de la mezcla (aire-carburante) y su distribución en la zona primaria de la cámara de combustión, condicionan las riquezas y temperaturas locales. Una mejora del sistema de inyección es, por lo tanto, una importante vía para reducir la contaminación; la sustitución de los tubos de vaporización por una inyección aerodinámica, Fig VIII.9 y 10, ha dado lugar a importantes mejoras en la emisión de contaminantes, especialmente en los inquemados.

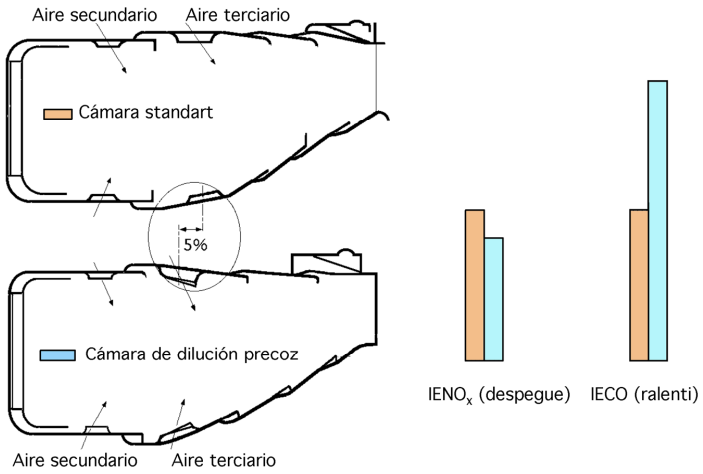

Fig VIII.10.- Cámara de dilución precoz

Optimización del reparto de aire.- Los niveles de contaminación emitidos dependen también del reparto de aire en el tubo de llamas; la fracción del gasto másico de aire que alimenta la zona primaria, la difusión e incluso el gasto másico de refrigeración, se deben regular para obtener el mejor compromiso entre las diferentes prestaciones.

Sin embargo, la optimización del reparto de aire en el tubo de llamas no permite establecer un compromiso entre las prestaciones y las sustancias contaminantes; en la Fig VIII.10 se muestra que si se modifica en una cámara la posición de los orificios de dilución, $aire_{terciario}$, la contaminación de los NO_x disminuye, pero ésto da lugar a una reducción del volumen de la cámara, en donde la temperatura es elevada, provocando un aumento de los niveles de inquemados *CH*.

Optimización del reparto de carburante.- En esta situación no se reducen los NO_x. En condiciones de baja carga, se puede optimizar la estequiometría de la zona primaria, regulando el reparto de carburante entre los inyectores, pero este tipo de solución exige un sistema de alimentación de carburante más complejo, no siendo válida para regímenes elevados; por lo tanto, no da lugar a reducciones directas de los niveles de NO_x, sino que favorece una débil producción, mejorando el compromiso entre el funcionamiento al ralentí y el funcionamiento a plena carga.

Acortamiento de la cámara de combustión.- El acortamiento de la cámara permite reducir el tiempo de permanencia al tiempo que limita la formación de los NO_x. La relación (longitud/diámetro) ha disminuido en un 30% en 30 años, lo cual ha sido posible por un mejor control de la aerodinámica interna del tubo de llamas que ha permitido acortar las cámaras sin aumentar la complejidad de las temperaturas de salida, y sin aumentar los inquemados, permitiendo obtener en las turbinas modernas niveles de NO_x equivalentes a los de los antiguos motores, a pesar del aumento de las relaciones de compresión.

Acción sobre el ciclo del motor.- El parámetro de contaminación definido en las normas internacionales es la masa de contaminante D_p emitida durante el ciclo de *aterrizaje-despegue* con relación al empuje de despegue:

$$\frac{G_{cont.}}{E_{desp.}} = \frac{Masa\ de\ contaminante\ emitida\ durante\ el\ ciclo\ aterrizaje\text{-}despegue}{Empuje\ de\ despegue}\ \frac{g}{kN} = k\ C_s\ (IE)$$

siendo: $\begin{cases} (IE)\ un\ índice\ de\ emisión\ que\ representa\ el\ nivel\ tecnológico\ de\ la\ cámara\ de\ combustión \\ C_s\ el\ consumo\ específico\ ligado\ al\ ciclo\ del\ motor \end{cases}$

Esto indica que, para disminuir el parámetro $\frac{G_{cont}}{E_{desp}}$ el constructor tiene dos posibilidades:

- Mejorar la cámara de combustión

- Seleccionar un ciclo que dé lugar a un menor consumo específico

La consecuencia directa de la mejora del consumo específico en todas las turbinas modernas, con

alta relación de dilución y en las turbinas tipo *propfan*, es la disminución de los niveles de contaminación.

VIII.5.- TECNOLOGÍA ACTUAL

Las diferentes técnicas de reducción expuestas, aplicadas a las turbinas modernas actualmente en servicio, han permitido reducir considerablemente los niveles de emisión de inquemados. Se han optimizado el sistema de inyección, el reparto de aire y carburante, etc, pero estas mejoras incrementan los NO_x debido al aumento de las relaciones de compresión de las turbinas.

La cámara de combustión representada en la Fig VIII.11 es ultracorta, $\frac{L}{A} = 1{,}75$, y ha sido adaptada a un ciclo de motor *propfan* dando lugar a un bajo consumo específico, con niveles de contaminación bastante por debajo de los límites vigentes, obteniéndose los siguientes resultados:

CO: $\frac{G_{cont.}}{E_{desp.}} = 34\ \frac{g}{kN}$; *Límite (OACI): 118*

Hidrocarburos no quemados: $\frac{G_{cont.}}{E_{desp.}} = 3\ \frac{g}{kN}$; *Límite (OACI): 19,8*

NO_x : $\frac{G_{cont.}}{E_{desp.}} = 46\ \frac{g}{kN}$; *Límite (OACI): 108*

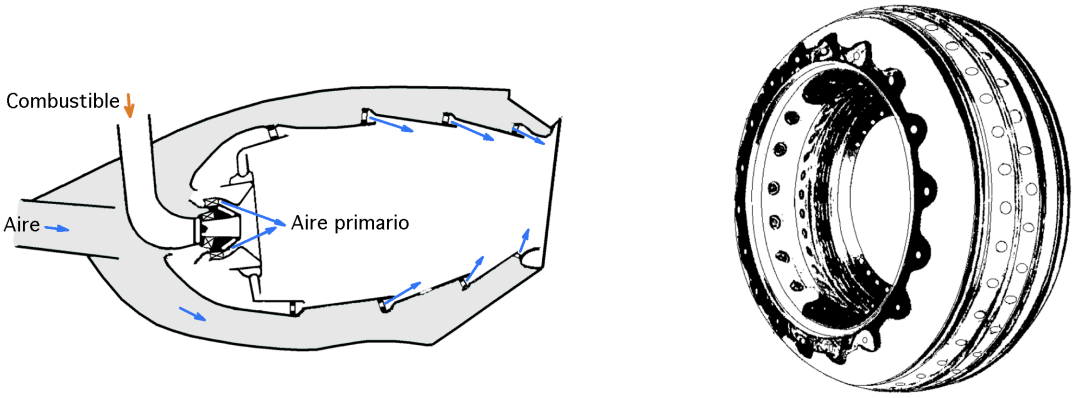

Fig VIII.11.- Cámara de combustión ultracorta

Se observa que a pesar de una alta relación de compresión cercana a 35, se han obtenido bajos niveles de NO_x, por lo que se puede aceptar que estas tecnologías se encuentran próximas a un compromiso óptimo, siendo escasas las mejoras que puedan obtenerse en el futuro.

VIII.6.- NUEVAS TECNOLOGÍAS

Para conseguir mejoras significativas en la reducción de los niveles de contaminación, es necesario imaginar otro tipo de soluciones tecnológicas, como:

Inyección escalonada.- La separación de las funciones de *ralentí* y *despegue* es una de las posibilidades para reducir el nivel de contaminación de una cámara, superando el compromiso entre la riqueza y el tiempo de permanencia en la zona primaria.

En la Fig VIII.12 se presenta un ejemplo de cámara de combustión con dos cabezas:

- La cabeza de ralentí posee un gran volumen (tiempo de permanencia elevado) y está alimentada por una cantidad de aire que permite optimizar la estequiometría de la zona primaria en condiciones de ralentí, produciendo pocos inquemados

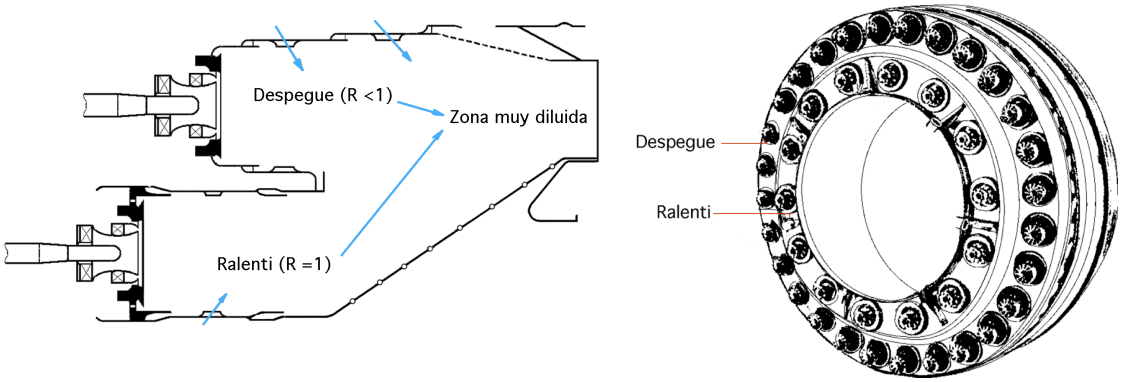

Fig VIII.12.- Cámara de combustión con dos cabezas

- La cabeza de despegue es de pequeño volumen (corto tiempo de permanencia), estando alimentada por una gran parte del aire suministrado por el compresor, de forma que se obtiene una zona primaria subestequiométrica, por cuanto el flujo desde la salida de la zona primaria queda muy diluido debido a una serie de orificios de dilución, consiguiéndose una fijación rápida de las reacciones de formación de NO_x a regímenes elevados.

Los niveles de contaminación obtenidos son inferiores a los de las tecnologías clásicas, reduciendo los NO_x en aproximadamente el 30%.

En general, la mejora de la contaminación se obtiene a costa de una mayor complejidad de la tecnología de la cámara y, especialmente, aumentando el número de inyectores. Las temperaturas de la pared son más elevadas, debido a la mayor superficie de pared del tubo de llamas, lo que es un problema; en determinados regímenes intermedios existe una cierta dificultad en alcanzar buenos rendimientos, por cuanto ambas cabezas están, necesariamente, lejos de su funcionamiento óptimo.

Geometría variable.- Permite regular el gasto másico en la zona primaria para cada régimen de funcionamiento. Si se desea optimizar el funcionamiento de la cámara en todos los regímenes, puede ser necesario introducir en el dimensionamiento un grado de libertad adicional que se puede alcanzar con la ayuda de una geometría variable que permita regular el gasto másico en la zona primaria para cada una de las condiciones de funcionamiento.

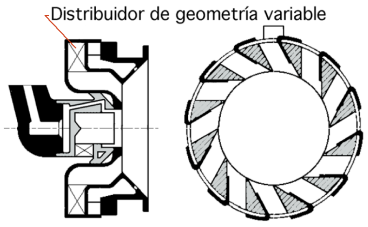

Fig VIII.13.- Sistema de inyección de geometría variable

Además de reducir la contaminación, la geometría variable tiene otras ventajas que pueden compensar los inconvenientes debidos a su tecnología más compleja, como un menor volumen de la cámara de combustión que permite reducir el espacio ocupado y el peso del motor, aumentando el intervalo de riquezas

y ampliando el campo de reencendido durante el vuelo. La geometría variable se puede combinar con técnicas de combustión escalonada.

Inyección con premezcla pobre.- La formación de NO_x depende mucho de las temperaturas y riquezas locales presentando un pico importante para las mezclas estequiométricas; una premezcla antes de la combustión permite minimizar las zonas en las que las riquezas estén próximas a la estequiométrica; en la Fig VIII.14 se presenta el esquema de esta cámara.

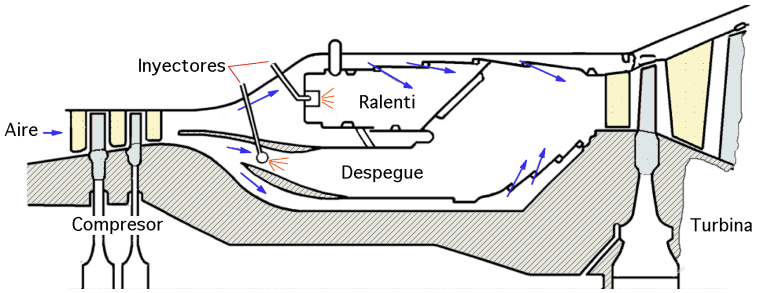

Fig VIII.14.- Cámara de combustión con premezcla pobre

La *cabeza de despegue* incluye un dispositivo de premezcla y estabilizadores de llama del tipo de recalentamiento. La ventaja aportada por la premezcla se suma, por lo tanto, al efecto producido por el corto tiempo de permanencia, permitiendo limitar la formación de NO_x.

El inconveniente de esta tecnología es el peligro de autoinflamación antes de los estabilizadores de la llama, por lo que el control de estos fenómenos de autoinflamación es una cuestión clave para la utilización de esta técnica, especialmente en las turbinas de elevadas relaciones de compresión.

Combustión rica, dilución rápida pobre.- Teóricamente es posible reducir las emisiones de NO_x efectuando las combustiones estequiométricas en la zona primaria y diluir rápidamente los gases para limitar el tiempo de permanencia en las zonas estequiométricas.

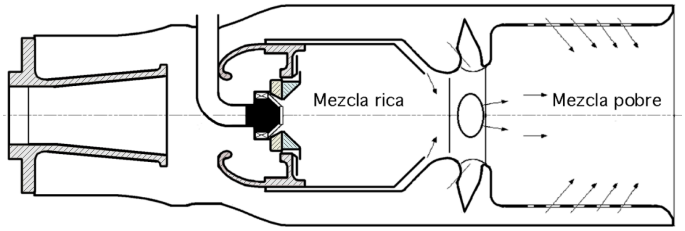

Fig VIII.15.- Cámara de combustión rica, dilución rápida, pobre

La puesta a punto de este tipo de cámara, Fig VIII.15, exige resolver ciertos problemas como:

- La producción de carbono en la zona primaria muy rica y la combustión en la zona de dilución

- La refrigeración de la zona primaria sometida a una radiación intensa debida a las partículas de carbono, evitando toda inyección de aire a fin de eliminar las zonas de mezcla estequiométricas

- La dilución rápida a estequiometría controlada

Combustión catalítica.- La combustión catalítica es otra forma de efectuar combustiones a baja temperatura. El principio consiste en estabilizar la llama a baja temperatura gracias a un catalizador, Fig VIII.16. Sin embargo hay que resolver los problemas debidos al ensuciamiento y al comportamiento térmico del catalizador si se quiere obtener una vida útil del mismo compatible con su utilización.

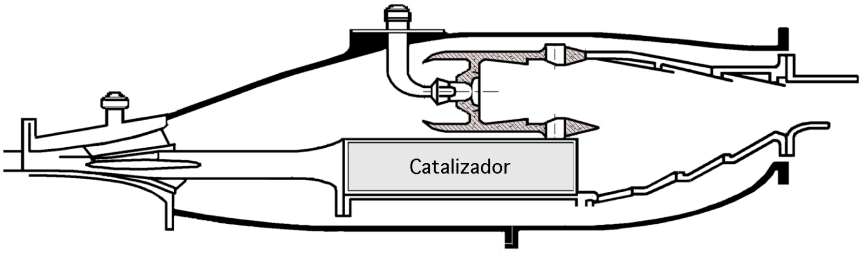

Fig VIII.16.- Cámara de combustión catalítica

Como conclusión, las tecnologías de tipo de cámara de dos cabezas parecen tener la suficiente fiabilidad como para permitir su aplicación a corto plazo. Sin embargo es preciso encontrar un equilibrio entre la reducción de aproximadamente el 30% en NO_x que puede aportar este tipo de tecnología y el aumento del peso y precio del motor; también hay que considerar su fiabilidad ligada a una mayor complejidad.

Las cámaras de combustión desarrolladas hasta ahora presentan niveles de contaminación que cumplen con las normas (OACI). Hace muchos años que las tecnologías anticontaminación son objeto de estudio y, sin embargo, las nuevas tecnologías presentan inconvenientes en lo que se refiere al coste, peso y fiabilidad, que habrá que tener en cuenta al realizar el dimensionamiento.

Todavía no se conocen bien los mecanismos químicos atmosféricos en los que participan las substancias emitidas a gran altura por las turbinas de aviación. Sin embargo se deben reducir de forma especial las emisiones de NO_x que siguen siendo un problema clave en el caso de los aviones supersónicos.