

Teoría básica de la cámara de combustión.

En las turbinas de gas la combustión se produce en un elemento denominado cámara de combustión, situado entre el compresor y la turbina. En la cámara de combustión se produce la reacción entre el flujo de aire procedente del compresor y el combustible inyectado, lo que origina el aumento requerido de la temperatura del flujo de gas y la consiguiente formación de contaminantes.

El proceso es muy complejo y su análisis requiere la solución de un flujo tridimensional turbulento con reacciones químicas a velocidad limitada. El objetivo de diseño de cámaras es la obtención del incremento de temperatura requerido con la máxima eficiencia, menor emisión de contaminantes posible, larga vida y bajo coste.

Dada la importancia del problema, en todos los países desarrollados existen programas de investigación y desarrollo sobre combustión en turbinas de gas. Así mismo actualmente hay un gran número de publicaciones sobre el tema en revistas especializadas.

En los párrafos siguientes, después de una breve descripción arquitectónica de las cámaras, se expone de forma conceptual y cualitativa el proceso de combustión, las actuaciones de cámaras y los parámetros que caracterizan la eficiencia del proceso. Se presenta la problemática del análisis teórico detallado del proceso y los métodos simplificados que permiten abordarlo. Finalmente, se analizan los factores clave que impulsan el desarrollo de cámaras de combustión avanzadas.

1. Arquitectura de cámaras de combustión y análisis cualitativo de procesos de combustión.

La figura 1 muestra la arquitectura típica de una cámara de combustión tubular convencional, alimentada con combustible líquido. Los componentes más relevantes son el tubo de llamas, donde se inyecta el combustible y se produce la combustión; el cárter que rodea al tubo de llamas y sirve como elemento de confinamiento y de unión con el compresor y turbina y, finalmente, el inyector de combustible. El tubo de llamas tiene múltiples aberturas y perforaciones por donde entra el aire procedente del compresor, bien sea para formar la mezcla, diluir los productos de combustión y rebajar su temperatura o para refrigerar el propio tubo de llamas. Especial atención merece la abertura central del domo o cúpula del tubo de llamas, coaxial con el inyector, que se denomina torbellinador ("swirler") y que juega un papel importante como se verá a continuación.

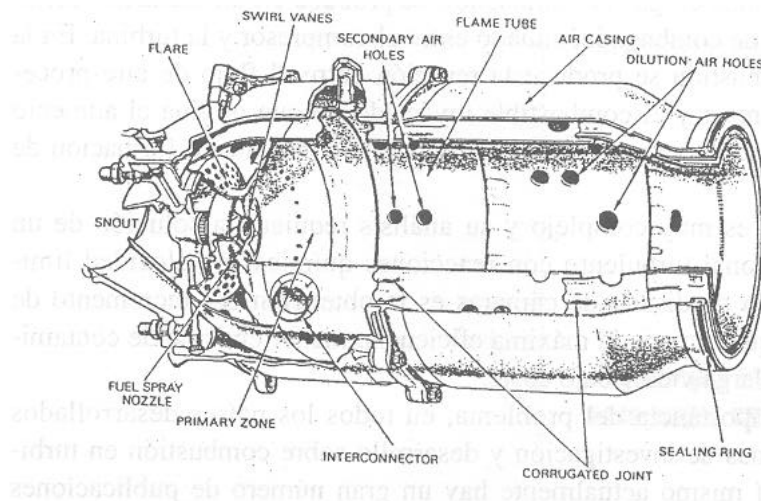


Figura 3.13 : Ejemplo de Cámara de Combustión.

La figura 3. presenta un esquema de funcionamiento de la cámara de combustión. El aire que procede del compresor se bifurca en dos flujos; un flujo que entra al tubo de llamas a través del torbellinador y otro flujo que circula por el anillo circular comprendido entre el tubo de llamas y el cárter y que luego entra escalonadamente al tubo de llamas a través de sus orificios laterales. El combustible se inyecta en la zona primaria, convenientemente atomizado.

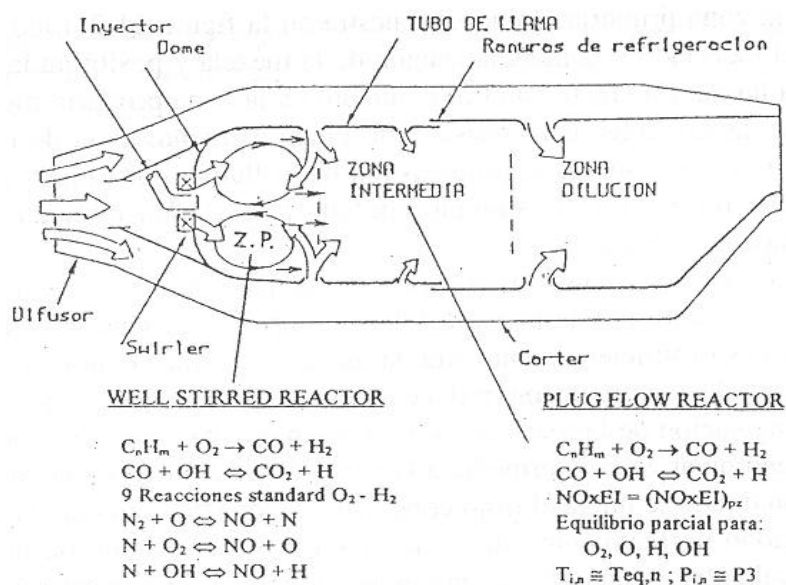


Figura 3.14 :Esquema de Funcionamiento de la Cámara de Combustión.

Con esta distribución de aire y combustible se consigue un dosado aproximadamente estequiométrico en la zona primaria, donde se produce la combustión. Téngase presente que el dosado relativo global de la cámara es típicamente .25 y en estas condiciones las mezclas hidrocarburos-aire no son inflamables. En esta zona primaria el aire que entra por el torbellinador adquiere una

componente de velocidad tangencial, lo que favorece el mezclado entre el aire y el combustible, y también produce una depresión en la región central próxima al torbellinador; pero por otra parte, el aire que entra por los orificios laterales, en forma de chorros, origina turbulencia y una sobrepresión en la región central del plano de los chorros. El resultado de esta distribución de presiones es la creación de una zona de intensa recirculación en la zona primaria, como se muestra en la figura 3.14, todo lo cual favorece el mezclado y homogeneización de la mezcla y posibilita la estabilidad de la llama. En efecto, si el movimiento en la zona primaria fuese unidireccional, la velocidad característica de funcionamiento sería de unos 30 m/s, valor muy superior al de propagación de la llama; por lo que, inevitablemente, se produciría el "soplado" de cualquier llama iniciada en una región de tan alta velocidad.

El flujo que sale de la zona primaria es enfriado al mezclarse con parte del aire que penetra por la primera hilera de orificios laterales, pero si la temperatura es lo suficientemente alta, la reacción química continúa hasta la sección donde la adición de aire reduce la temperatura al nivel al que se produce la congelación de la reacción. Teniendo en cuenta esta fenomenología, se suele denominar zona intermedia a la comprendida entre la zona primaria (ZONA 1) y la sección donde se inicia el flujo congelado. Y zona de dilución (ZONA 2) al resto.

El método normalmente establecido para proteger el tubo de llama de los gases calientes producidos en la combustión es el de refrigeración pelicular. Con este procedimiento se forma una película de aire que fluye por la cara interior del tubo de llamas. La mayoría de los diseños corrientes usan algún tipo de hileras circunferenciales de orificios espaciadas axialmente a lo largo del tubo de llamas. Varias configuraciones se muestran en la figura 3.15.

Un desarrollo reciente (refrigeración por transpiración) consiste en hacer fluir el aire de refrigeración por una red de numerosos canales en el interior del tubo de llamas antes de ser inyectado para formar la película de aire. Con este método se puede reducir el aire necesario para la refrigeración en un 50%.

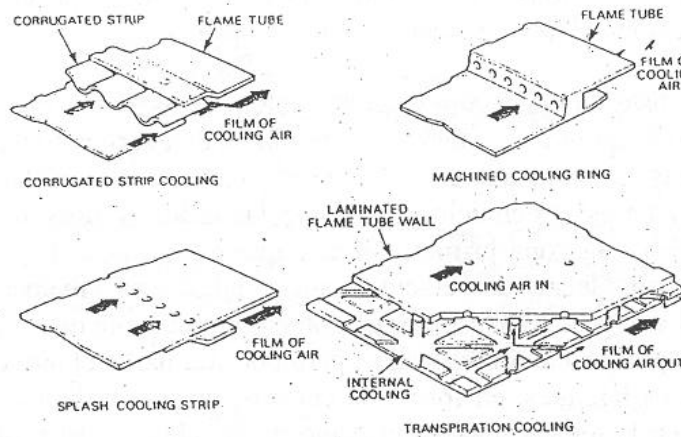


Figura 3.15 Sistemas de Refrigeración Pelicular.

Los inyectores producen una nube de finas gotas distribuidas en una capa cónica concéntrica con el eje de la cámara, para favorecer el mezclado con el aire. Existen diversos tipos, desde el conocido inyector que pulveriza o atomiza por presión hasta el inyector en el que las fuerzas aerodinámicas entre líquido-aire juegan un papel primordial (figura 3.16).

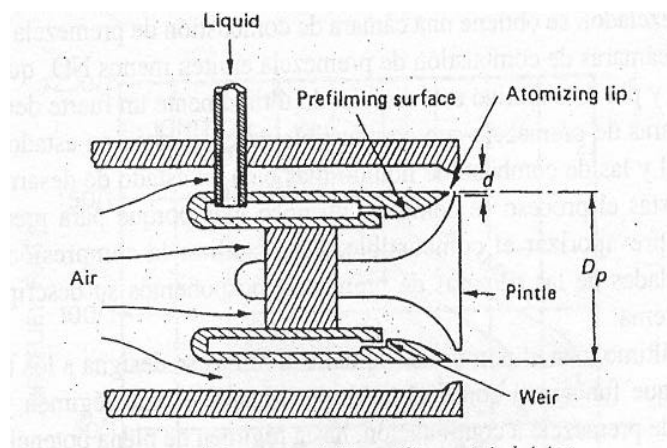


Figura 3.16 : Inyector Airblast. Geometría Básica.

Por razones de integración de la cámara en el sistema y por compacidad, sobre todo en las turbinas aeroderivadas, la cámara se hace multitubular. Los tubos se sitúan en una circunferencia concéntrica con el eje. Aún más compacta resulta la cámara anular (figura 5), pero su funcionamiento es como el descrito para las cámaras tubulares.

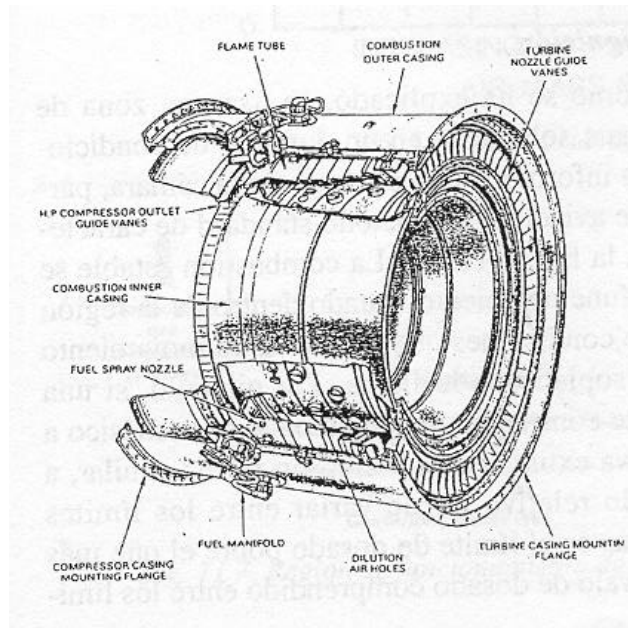


Figura 3.17 : Cámara de Combustión Anular.

Hasta ahora hemos supuesto que el combustible usado es líquido, pero se puede utilizar combustible gaseoso con la misma cámara, sin más que usar un sencillo inyector de gas. Los inyectores de gas, en esencia, son un elemento multiperforado que produce una capa cónica de chorros de gas.

Todas estas cámaras descritas se denominan cámaras de difusión porque el combustible y el aire están inicialmente separados y la mezcla íntima entre el combustible y el aire se produce finalmente por difusión. Si en la zona primaria se introduce el combustible y el aire premezclados, mediante un inyector premezclador, se obtiene una cámara de combustión de premezcla.

Las cámaras de combustión de premezcla emiten menos NO_x que las de difusión, y por este motivo está recibiendo últimamente un fuerte desarrollo. Las cámaras de premezcla con combustible gaseoso están en estado de uso comercial y las de combustible líquido más bien en estado de desarrollo, ya que en éstas el proceso se complica un poco más porque para premezclar hay que prevaporizar el combustible.

Por último, con el nombre de cámaras híbridas se designa a los tipos de cámaras que funcionan como cámaras de difusión a bajo régimen y como cámaras de premezcla a continuación, hasta régimen de plena potencia.

2. Aspectos básicos. Actuaciones.

Dominio de estabilidad e ignición.

Para estabilizar la llama, como se ha explicado, se usa una zona de

recirculación. Pero esto se consigue solamente en un dominio de condiciones de operación y constituye una información importante de la cámara, particularmente en turbinas de gas de aviación. Un método standard de caracterizar la estabilidad se presenta en la figura 3.18. La combustión estable se produce para cualquier punto de funcionamiento situado dentro de la región estable, pero cualquier cambio de condiciones que produzca un movimiento a través de la curva produce el soplado de la llama. Por ejemplo, si una cámara opera a dosado equivalente constante, un aumento del gasto másico a valores superiores a los de la curva extinguirán la llama. En forma similar, a gasto másico constante el dosado relativo puede variar entre los límites pobre y rico. El intervalo de dosado comprendido entre los límites rico y pobre se reduce al aumentar el gasto másico, y si éste aumenta por encima de cierto valor, la llama se extingue. Obsérvese que el punto de máximo gasto másico se produce cerca del dosado estequiométrico; esto corresponde a la condición de máxima temperatura y de velocidad de la llama. Esto significa una tendencia general, de tal modo que cualquier cambio que produzca un aumento de la velocidad de llama también mejora la estabilidad de la misma.

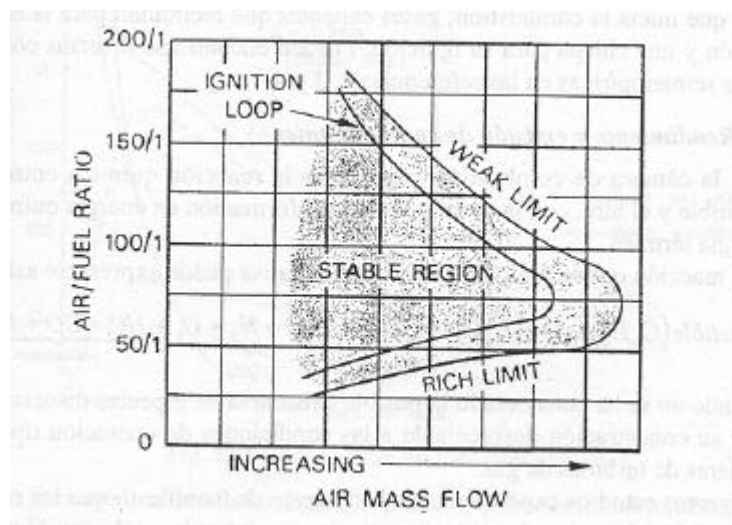


Figura 3.18: Límites de estabilidad de Llamas.

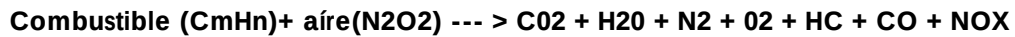
El proceso de ignición está caracterizado igualmente por un dominio similar al de estabilidad, aunque es más restringido que éste, por cuanto es más difícil de establecer la combustión que mantenerla. Dentro del dominio de ignición la información más relevante es la energía mínima de ignición.

La mayor parte de los modelos de estabilización e ignición son similares, ya que estabilización e ignición son fenómenos similares. En ambos casos, una mezcla aire-combustible debe ser calentada de forma que la generación de calor por reacción química sea suficiente para mantener la reacción. La diferencia entre ignición y estabilización de llama es la fuente de energía que inicia la combustión; gases

calientes que recirculan para la estabilización y una chispa para su ignición.

Rendimiento y emisión de contaminantes.

En la cámara de combustión tiene lugar la reacción química entre el combustible y el aire, con la consiguiente transformación de energía química en energía térmica. La reacción química global en forma cualitativa puede expresarse así:



donde no se ha considerado la posible existencia de especies disociadas, por ser su concentración despreciable a las condiciones de operación típicas de cámaras de turbinas de gas. En ecuación representada anteriormente no se ve reflejada tampoco la existencia de azufre en la composición del combustible, aunque si existe como se puede deducir a la vista de los productos de reacción. Lo que se ha hecho es utilizar una nomenclatura general de los hidrocarburos para dar mayor significado a la ecuación.

Diversos estudios experimentales han puesto de manifiesto que los niveles de emisión de contaminantes son superiores a los valores de equilibrio y que el flujo de contaminantes entre las secciones de salida de la cámara y motor es congelado. En consecuencia, el problema del estudio de formación de contaminantes debe centrarse en la cámara de combustión que es el elemento donde se generan.

Por otra parte, varios resultados experimentales obtenidos en cámaras de combustión como los mostrados en la figura 7 ponen de manifiesto los siguientes hechos:

- La concentración espacial de los contaminantes en la cámara también es diferente a la de equilibrio.
- Los gradientes axiales de concentración en la sección de salida de la cámara son pequeños.
- Los óxidos de Nitrógeno se forman en la zona primaria y su variación posterior es debida fundamentalmente al efecto de dilución.
- El monóxido de carbono se forma rápidamente y su concentración disminuye apreciablemente en la zona secundaria, igual que sucede con los inquemados.

Por lo tanto, la determinación teórica de la temperatura y composición de los gases requiere resolver, en general, un flujo reactante tridimensional en el que la cinética química juega un papel importante.

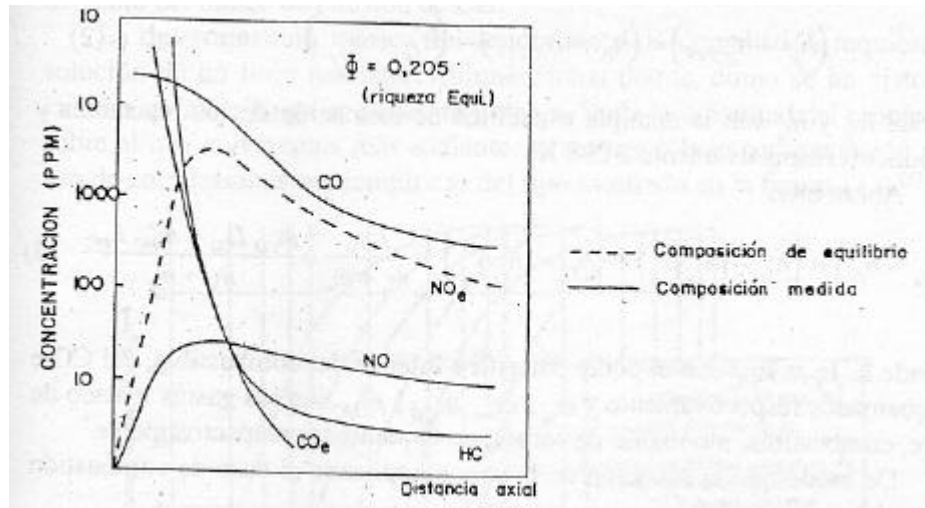


Figura 3.19

Para evaluar la eficiencia del proceso definiremos el rendimiento de combustión como el incremento de entalpía sensible real producido con respecto al ideal, esto es cuando la combustión es completa y adiabática (CC). Es decir:

$$h_q = \frac{(h_q - h_{q,298}) - (h_R - h_{R,298})}{(h_q - h_{q,298})_{CC} - (h_R - h_{R,298})}$$

En el proceso real la cantidad de calor que se intercambia con el exterior es despreciable, por lo que se puede considerar adiabático, pero la combustión, como hemos visto, es incompleta y por esto el incremento de entalpía sensible obtenido es menor que en el proceso ideal.

La determinación teórica del rendimiento de la combustión requiere la solución de un flujo tridimensional doble donde, como se ha visto, la cinética química tiene un papel importante. Dada la dificultad del problema, se recurre a la experimentación y al uso de correlaciones semiempíricas.

Pérdida de presión de remanso.

Como consecuencia del calentamiento del flujo en la cámara y de la fricción, se produce una disminución de la presión total o de remanso de la corriente. A este hecho se le denomina pérdida de presión de remanso. La información apropiada se expresa mediante la variación relativa de la presión de remanso entre la salida y la entrada:

$$\frac{P_{0E} - P_{0S}}{P_{0E}}$$

La pérdida de presión dependerá de gran cantidad de parámetros de tipo geométricos, de flujo, etc. Generalmente para su cuantificación se recurre a la experimentación y al uso de correlaciones semiempíricas. En cualquier caso las pérdidas relativas de presión son del orden del 2%-6%.

3. Análisis teórico del proceso de combustión.

Consideraciones preliminares.

El análisis teórico del proceso de combustión en general y, más concretamente, el cálculo del rendimiento de combustión, temperatura de los productos y de la emisión de contaminantes en la cámara de combustión de una turbina de gas, implica la resolución de un movimiento tridimensional y turbulento con reacciones químicas a velocidad limitada.

La solución numérica del flujo frío con las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas y modelos de cierre de turbulencia de dos ecuaciones, parece que proporciona resultados satisfactorios actualmente, pero requiere alto coste computacional. La inclusión de los términos de producción por reacción química, en cambio, presenta serias dificultades de cálculo que hoy en día no están resueltas, que son objeto de investigación y a las que nos referiremos a continuación. En efecto, la determinación de los términos de producción implica por una parte el conocimiento del esquema de cinética química apropiada o conjunto de reacciones elementales y, así mismo, el de la velocidad de reacción de cada una de ellas. En cuanto al esquema de cinética química, la dificultad del problema reside básicamente en las reacciones de descomposición de los hidrocarburos, que no son suficientemente conocidas, salvo en casos elementales como el del metano. Una solución consiste en suponer una sola reacción de descomposición global a velocidad limitada. Salvadas estas carencias, supuestamente conocidas las velocidades de las reacciones y modelados los términos de producción, la dificultad estriba en la evaluación de estos términos en un movimiento turbulento. Esto es así por cuanto al depender de forma exponencial con la temperatura, resulta que el valor promedio difiere del valor que se obtiene con la temperatura media, incluso en un orden de magnitud.

Métodos simplificados.

Teniendo en cuenta las características más relevantes del flujo en cada zona de la cámara, pueden realizarse ciertas hipótesis que permiten simplificar el cálculo del

movimiento de manera razonable. Así se obtienen los modelos que denominaremos modelos zonales de la cámara. A título ilustrativo, un modelo zonal básico supone que la zona primaria es homogénea ("well stirred reactor = W.S.R.), la zona intermedia un flujo unidimensional reactante ("plug flow reactor = P.E.R.), y la zona de dilución un flujo unidimensional sin reacción. En general, una cámara puede ser modelada combinando varios W.S.R. y P.E.R. Si en estos submodelos se supone además, para mayor simplificación, que los términos de producción son evaluados a partir de un esquema de cinética química simplificado y se ignora la influencia de la turbulencia, se obtienen modelos analíticos. La solución se obtiene mediante un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales y el problema resulta razonablemente abordable. Desde un punto de vista cualitativo, este tratamiento de los términos de producción es aceptable y proporciona la dependencia de la emisión de contaminantes y rendimiento de la cámara con las variables que gobiernan el problema, pero desde un punto de vista cuantitativo, los resultados son dudosos, cuando menos, por todo lo mencionado anteriormente y por la influencia del grado de mezcla.

Una alternativa consiste en modelar los términos de producción de contaminantes mediante correlaciones experimentales, basadas en los análisis anteriores, resultando modelos semianalíticos que proporcionan mejores resultados cuantitativos.

4. Factores de desarrollo.

Factores principales.

El diseño de la cámara consiste en la determinación de la geometría con la que se obtiene el incremento de temperatura requerido, con el mayor rendimiento posible, compatible con menor tamaño (volumen), menores pérdidas y menor emisión de NO_x (en cualquier caso inferior al valor límite exigido por la normativa).

Con diseños de cámaras convencionales se obtienen rendimientos elevados (> 99.5% a régimen nominal) y pérdidas de presión aceptables (<5%) en cámaras relativamente compactas, pero los niveles de emisión (fundamentalmente NO_x) no cumplen con la normativa actual o con las expectativas futuras. Es, por tanto, el control y la reducción de emisión de contaminantes el factor que ha impulsado últimamente el desarrollo de los combustores, bien propiciando el rediseño de los combustores de difusión convencionales o con la comercialización de combustores avanzados de premezcla.

Por otra parte, el aumento previsible de la temperatura de entrada en turbina requerirá aumentar el incremento de temperatura en la cámara; por lo que los

problemas de refrigeración del tubo de llamas y de materiales constituye otro factor clave en los nuevos desarrollos.

Métodos de reducción y control de contaminantes.

Del análisis teórico del proceso de combustión queda claro que el principal parámetro que gobierna la emisión de contaminantes es la temperatura de la zona primaria y, en menor medida, el tiempo de residencia y grado de mezcla.

La dificultad en la reducción de las emisiones, como ilustra la figura 3.20, deriva de la influencia contrapuesta de T_{zp} y también de las otras variables sobre las emisiones de CO y HC por una parte y de NO_x por otra. Es necesario, por tanto, con la mayor parte de los métodos, llegar a una solución de compromiso.

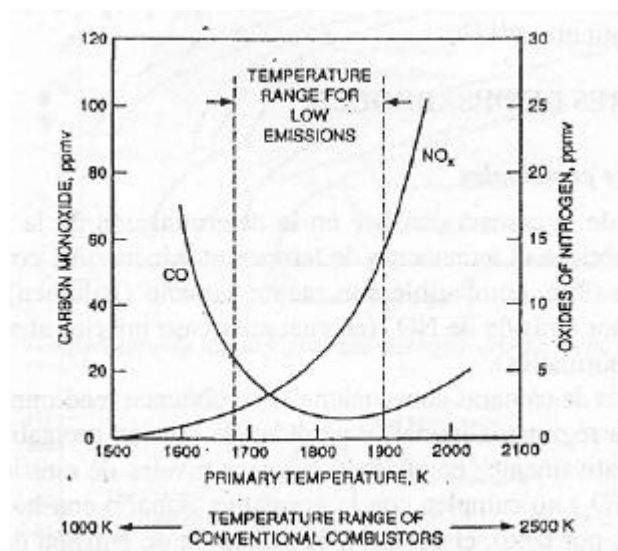


Figura 3.20: Influencia de la Temperatura de la Zona Primaria en la formación de CO y NO_x.

En la literatura técnica sobre este tema se pueden encontrar diversas soluciones, basadas en las ideas y resultados anteriormente presentados y que pueden encuadrarse en la Tabla 1. Es interesante mencionar que en muchos desarrollos se aplican varios conceptos o técnicas simultáneamente.

MÉTODO (CONCEPTO)	ESTADO ACTUAL
OPTIMIZACIÓN T_R	
- Volumen zona primaria	- Utilización
HOMOGENEIZACION MEZCLA	
Mejora inyectores	- Utilización y desarrollo
Aumento nivel de turbulencia	- Utilización
OPTIMIZACION Y CONTROL T_{zp}	
- Inyección de agua.	- Utilización
- Geometría variable "swirler o área de dilución"	- Desarrollo
- Inyección escalonada (serie o paralelo)	- Utilización y desarrollo
- Combustión catalítica	- Investigación y desarrollo
- Combustión "rica, dilución rápida, pobre"	- Investigación
- Premezcla pobre	- Utilización y desarrollo
- Prevaporización y premezcla pobre	- Utilización y desarrollo

Tabla 3.2: Métodos de control de contaminantes.

Los conceptos de mayor potencial están basados en el mantenimiento de la región o regiones de combustión dentro de una estrecha banda de temperaturas en todo el campo de regímenes del motor. Dentro de este bloque los combustores de premezcla pobre han sido desarrollados para turbinas de gas de uso industrial, y están en consideración para transporte supersónico, siendo capaces de producir las menores emisiones de NO_x cuando se complementa este concepto con el de inyección escalonada. Los combustores catalíticos tienen el mismo potencial, pero la corta vida del catalizador les hace inviables en este momento. Otras tecnologías como la combustión rica/enfriamiento rápido/combustión pobre no es probable que alcancen tan bajos niveles de emisión de NO_x a las condiciones del ciclo de interés.