

INVESTIGACIONES RECIENTES SOBRE COMBUSTION SUPERSONICA EN EL INTA^(*)

Por Ignacio DA-RIVA y José Luis URRUTIA
Dres. Ingenieros Aeronáuticos INTA

*Presentado en el XVII Congreso de la Federación Internacional
de Astronáutica, celebrado en Madrid.*

1. Introducción.

El interés de la combustión supersónica en relación con la Astronáutica, procede de que parece posible situar cargas pesadas en órbita mediante un sistema propulsor mixto que, durante su recorrido a velocidad hipersónica a través de la atmósfera, utilice el oxígeno del aire como oxidante. La mezcla con el combustible y la combustión se realizan muy rápidamente, y se trata de evitar, en lo posible, los aumentos de temperatura estática excesivos y las pérdidas asociadas con la deceleración del aire. El propulsor, provisto de este sistema de combustión, se llama SCRAMJET (Supersonic Combustion Ram Jet).

Ciertos estudios previos parecen demostrar que un vehículo lanzador propulsado por SCRAMJET, sería más ligero, menor y más maniobrero que los vehículos actuales propulsados por cohetes. Incidentalmente se puede añadir que el coste operativo de un avión hipersónico propulsado por SCRAMJET, no sería mayor que el de un transporte supersónico.

De todos los sistemas de combustión supersónica propuestos, parece que el método puramente difusivo es el que mejor se adapta a los números de Mach de vuelos altos ($6 < M < 25$), ya que una pequeña deceleración de la corriente puede ser suficiente para elevar la presión y la temperatura, de forma tal que combustible y oxidante ardan en cuanto se ponen en contacto.

Independientemente de sus posibles aplicaciones, la combustión supersónica difusiva plantea, en su estado actual, problemas básicos intrigantes, cuya solución puede ser abordada por un pequeño grupo. Tales problemas derivan del insuficiente estado actual de conocimientos en ciertos dominios, por ejemplo; cinética química y mezcla turbulenta de gases, especialmente gases de densidades muy diferentes, entre otros no menos interesantes.

El trabajo del grupo INTA se encamina a estudiar analíticamente ciertos aspectos de estos dos problemas, con el fin de contribuir a una utilización más eficaz de los calculadores electrónicos en el estudio de configuraciones más complicadas y realistas, y a una interpretación lógica de los resultados experimentales.

(*) Los trabajos sobre combustión supersónica en el INTA han sido subvencionados por: *European Office of Aerospace Research* (OAR) USAF. Grant núm. 62-91 ; 63-43 ; 65-69 ; 66-41. *ARO Inc.* Subcontract núm. 67-9-RTF.

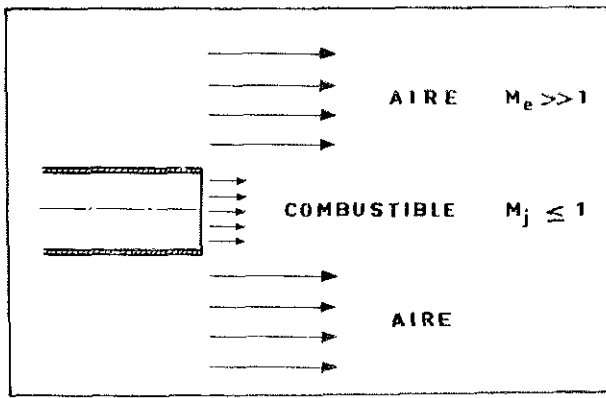


Figura 1

La configuración particular considerada consiste (figura 1) en un chorro de combustible gaseoso (hidrógeno), normalmente a baja velocidad, descargando paralelamente a una corriente ilimitada de aire a velocidad supersónica.

2. Llamas de difusión.

Cuando la temperatura y presión de la corriente son suficientemente grandes y los gradientes de concentración de especies no son excesivos, el tiempo característico de la duración de la reacción química es mucho menor que el tiempo de difusión. En tal caso es posible resolver el problema, siguiendo el procedimiento propuesto hace muchos años por Burke y Schumann¹, consistente en suponer que la reacción química es infinitamente rápida y que, por tanto, combustible y oxidante no coexisten en ninguna zona, estando separados por una llama infinitamente delgada a la que llegan por uno y otro lado en proporción estequiométrica.

Mediante este procedimiento el análisis se reduce al de un problema de mezcla, y los resultados obtenidos han sido confirmados por la experiencia en multitud de casos. Dos referencias recientes corresponden a una llama laminar difusiva² y a una llama turbulenta a baja velocidad³.

En el caso de combustión supersónica-hipersónica se puede aplicar el método de Burke-Schumann para estudiar el problema de mezcla con reacción, salvo en las proximidades del inyector, donde, debido a que los gradientes de concentración son muy elevados y las temperaturas no muy altas, el tiempo químico es comparable al mecánico.

2. Llamas premezcladas hidrógeno-aire.

Existe una multitud de estudios teóricos y experimentales sobre las llamas premezcladas de hidrógeno-aire (o hidrógeno-oxígeno-diluyente).

Aunque dichos estudios sólo pueden ser utilizados en nuestro caso como indicativos de tendencias, pueden ayudarnos a discutir la estructura de la llama de difusión.

En las llamas premezcladas hidrógeno-aire es posible distinguir las zonas siguientes:

- Una zona de inducción en la que se producen radicales, y en la que la temperatura y concentraciones de las especies principales no están afectadas por la reacción química⁴.
- Una zona posterior de liberación de energía, que termina cuando las distintas especies alcanzan el equilibrio.

Debido a que las velocidades específicas de las reacciones 1 a 4, tabla 1, son mucho mayores que las correspondientes a las reacciones 5 a 8, se acostumbra a dividir esta zona en dos partes: una primera, normalmente muy corta, al final de la cual algunas de las reacciones 1 a 4 han alcanzado prácticamente el equilibrio parcial, y las concentraciones de agua y reactante en exceso su valor definitivo; y una segunda parte, en la que las ecuaciones de

TABLA Nº 1

0	$H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2OH$
1	$OH + H_2 \rightleftharpoons H_2O + H$
2	$2OH \rightleftharpoons H_2O + O$
3	$H + O_2 \rightleftharpoons OH + O$
4	$O + H_2 \rightleftharpoons OH + H$
5	$H + H + X \rightleftharpoons H_2 + X$
6	$O + O + X \rightleftharpoons O_2 + X$
7	$H + OH + X \rightleftharpoons H_2O + X$
8	$O + H + X \rightleftharpoons OH + X$

recombinación 5 a 8, que en principio están fuertemente desequilibradas, se encargan de hacer desaparecer las especies sobrantes.

En el caso de mezcla rica (relación molar hidrógeno-oxígeno mayor que 2), los experimentos ⁵ demuestran que la relación entre las concentraciones de H y OH corresponde muy pronto al equilibrio de la reacción 1. Las concentraciones de O y O₂ resultan ser muy pequeñas, pero en primera aproximación se pueden relacionar con las de OH, H₂O y H₂, expresando el equilibrio de las reacciones 3 y 4. Como las concentraciones de OH y H particularmente, no son nulas al final de este período, entran en juego las reacciones 5 a 8. La velocidad de desaparición de OH, obtenida mediante este esquema, está de acuerdo con los experimentos.

En el caso de mezcla pobre, el problema parece más complicado ^{6, 7}. Es posible obtener una relación entre OH y O, expresando el equilibrio de la reacción 2, y probablemente las reacciones 1, 3 y 4 se equilibren rápidamente, pero los experimentos realizados parecen indicar que la desaparición de radicales es mucho más rápida que la que se obtendría teóricamente en presencia de las reacciones de recombinación 5 a 8 únicamente.

4. Llamas de difusión. Hidrógeno-aire.

El estado de conocimientos es todavía menos satisfactorio en el caso de llamas de difusión. Sin embargo, de acuerdo con las consideraciones presentadas en párrafos 2 y 3, podremos distinguir las siguientes zonas.

a) Zona de inducción. Se producen radicales, fundamentalmente H. Una vez que la concentración de H ha alcanzado un valor apropiadamente alto, comienza la zona B.

La temperatura y las concentraciones de reactivos se calculan suponiendo que no existe reacción química.

Los tiempos de reacción y difusión son comparables.

Existe cierto confusionismo en la literatura, parcialmente debido al hecho de que se intenta utilizar datos experimentales obtenidos con llamas premezcladas para calcular la longitud de esta zona, lo que no parece estar justificado. Pero, además, es difícil correlacionar datos obtenidos en diferentes laboratorios debido, probablemente, a la presencia inicial no controlada de radicales, que hace innecesarias las reacciones de iniciación 5 (inversa) y 6 (inversa) que son muy lentas, dando paso directamente a las reacciones rápidas 1, 2, 3 y 4.

En el caso difusivo, aunque no existen datos en la literatura que permitan asegurarlo, se puede pronosticar que las discordancias entre los resultados obtenidos en diferentes laboratorios serán aún mayores, debido a la aparición de radicales, por las siguientes razones:

1.º El método particular utilizado en las diferentes instalaciones de ensayo, para producir entalpías de remanso elevadas.

2.º La existencia de disociación en la capa límite exterior del inyector, aunque esté refrigerado y el grado de disociación de la corriente exterior a la capa límite sea despreciable. Este caso ha sido discutido recientemente por Liñán, Fraga y Urrutia ⁸ de una forma muy sencilla.

3.º La posible existencia de recirculación cerca de la salida del inyector, cuando la cantidad de movimiento de la corriente exterior es muy grande comparada con la inyectada (del orden de 15 a 20 veces).

b) Zona de liberación de energía. Cerca del equilibrio, la llama de difusión es muy delgada. De hecho, su espesor es nulo cuando la velocidad de reacción es infinita. Es posible demostrar que, en el interior de la zona de reacción, los efectos de la convección son despreciables, que la distribución transversal de temperaturas es uniforme y que las distribuciones de las especies se pueden calcular resolviendo las ecuaciones diferenciales ordinarias, resultantes de expresar que en cada sección la difusión transversal equilibra la producción química, con las condiciones de contorno de que, a cierta distancia de la llama, las distribuciones obtenidas se adapten a las calculadas, suponiendo que la velocidad de reacción es infinita.

El caso de reacción única de segundo orden fue resuelto en ⁹, y la aplicación del método al esquema completo de combustión hidrógeno-oxígeno (o aire) ha sido considerado en ¹⁰, utilizando, para calcular las distribuciones de especies, un método integral consistente en aproximar los términos de evolución química de cuatro especies (H₂, O₂, H₂O y una combinación de H₂O y HO), mediante curvas tales que: a) Su valor máximo corresponda al valor real calculado *a posteriori*, aplicando la ley de acción de masas, una vez conocidas las distribuciones de todas las especies; b) la posición del máximo y el área encerrada por la curva, calculados de forma que el comportamiento de dichas especies, a una distancia de la llama grande comparado con su espesor, sea el asintótico correspondiente a velocidad de reacción infinita.

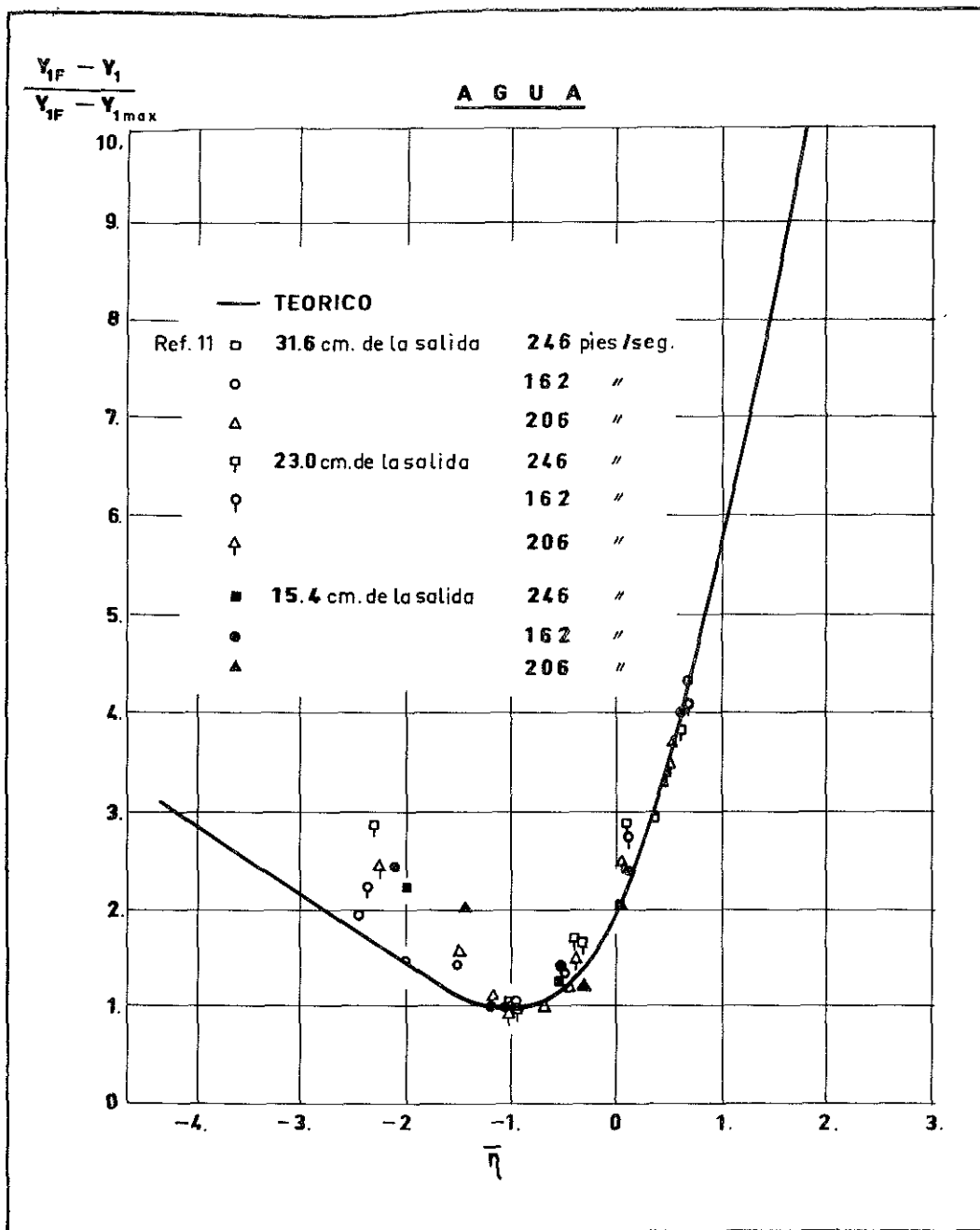


Figura 2

Los cálculos realizados indican que las reacciones rápidas están muy cerca del equilibrio. En las proximidades del punto de máximo desequilibrio el papel de las reacciones de recombinación es insignificante, como ocurre en el caso premezclado. Por otra parte, dado que se trata de un método integral con un único punto testigo interior, no es previsible que el resultado indique con fidelidad la zona en que las ecuaciones de recombinación son importantes. Sin embargo, hay que observar que, resul-

tando la concentración de OH insignificante en ambos bordes de la llama, no parece que dicha zona sea extensa.

La falta de resultados experimentales sobre la distribución de radicales, impide valorar este aspecto del método, que parece ser apropiado en lo relativo a especies principales (fig. 2 a 4).

Cuando las condiciones no son tan próximas al equilibrio, no es posible utilizar la solución anterior que es el primer término de un desarrollo asin-

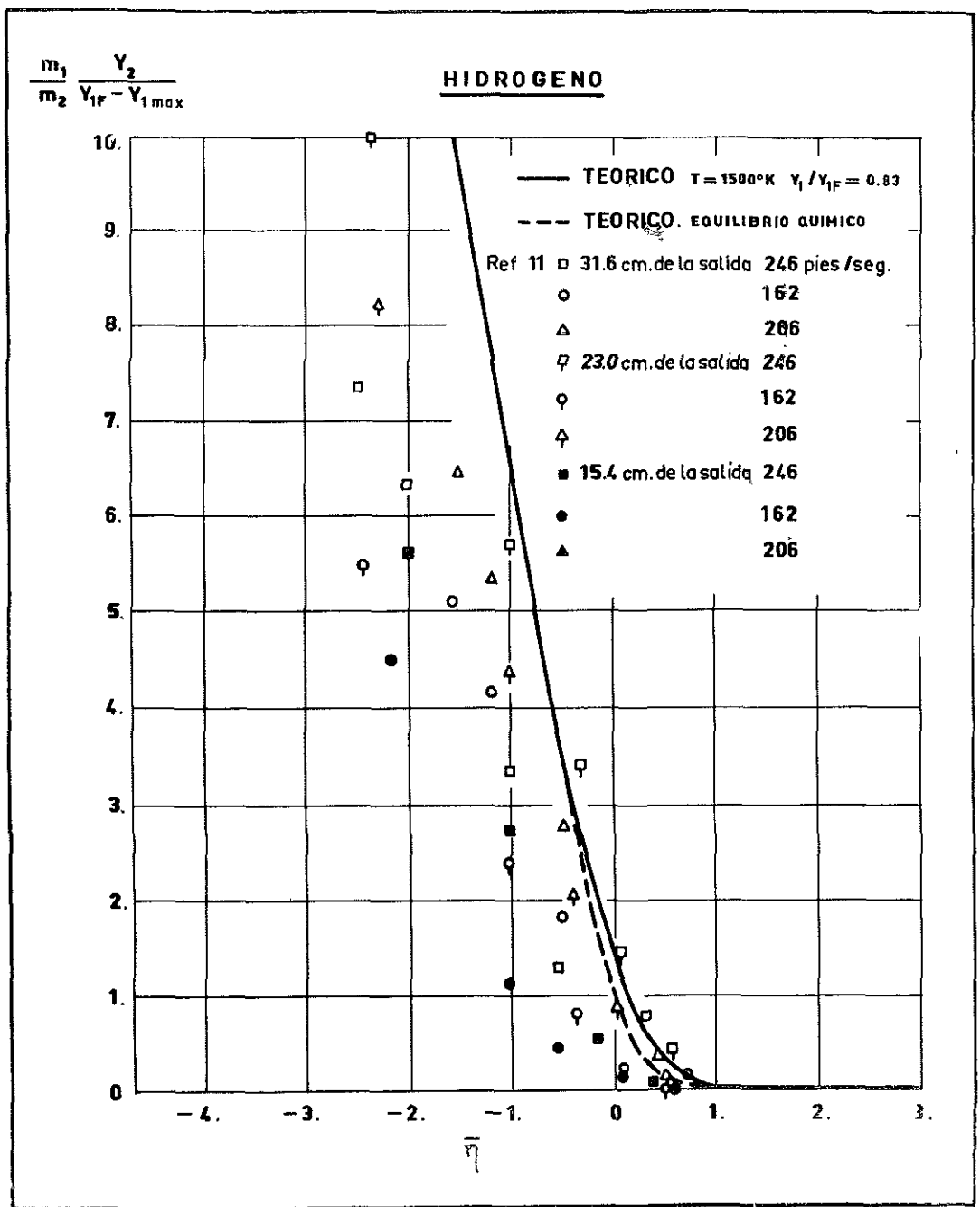


Figura 3

tótico en un parámetro grande, que representa la relación entre el tiempo mecánico característico y el tiempo químico. La obtención de términos de mayor orden del desarrollo no parece fácil, por lo que se ha recurrido a utilizar un método integral análogo al anterior, pero que tiene en cuenta el efecto de la convección, despreciable cuando la llama es delgada. Hasta ahora, sólo ha sido aplicado el método en el caso sencillo de reacción química de la forma $A + B \rightleftharpoons C$, para el que se tiene una solución numérica exacta obtenida con un calculador digital⁹.

La figura 5 da la distribución de temperaturas a lo largo de la línea de máxima velocidad de reacción, mostrando que el acuerdo entre ambas soluciones es suficiente.

5. Configuración de la corriente en las proximidades del inyector.

Es interesante estudiar la posibilidad de mejorar aerodinámicamente la mezcla y disminuir la distancia de inducción, sin perturbar excesivamente la

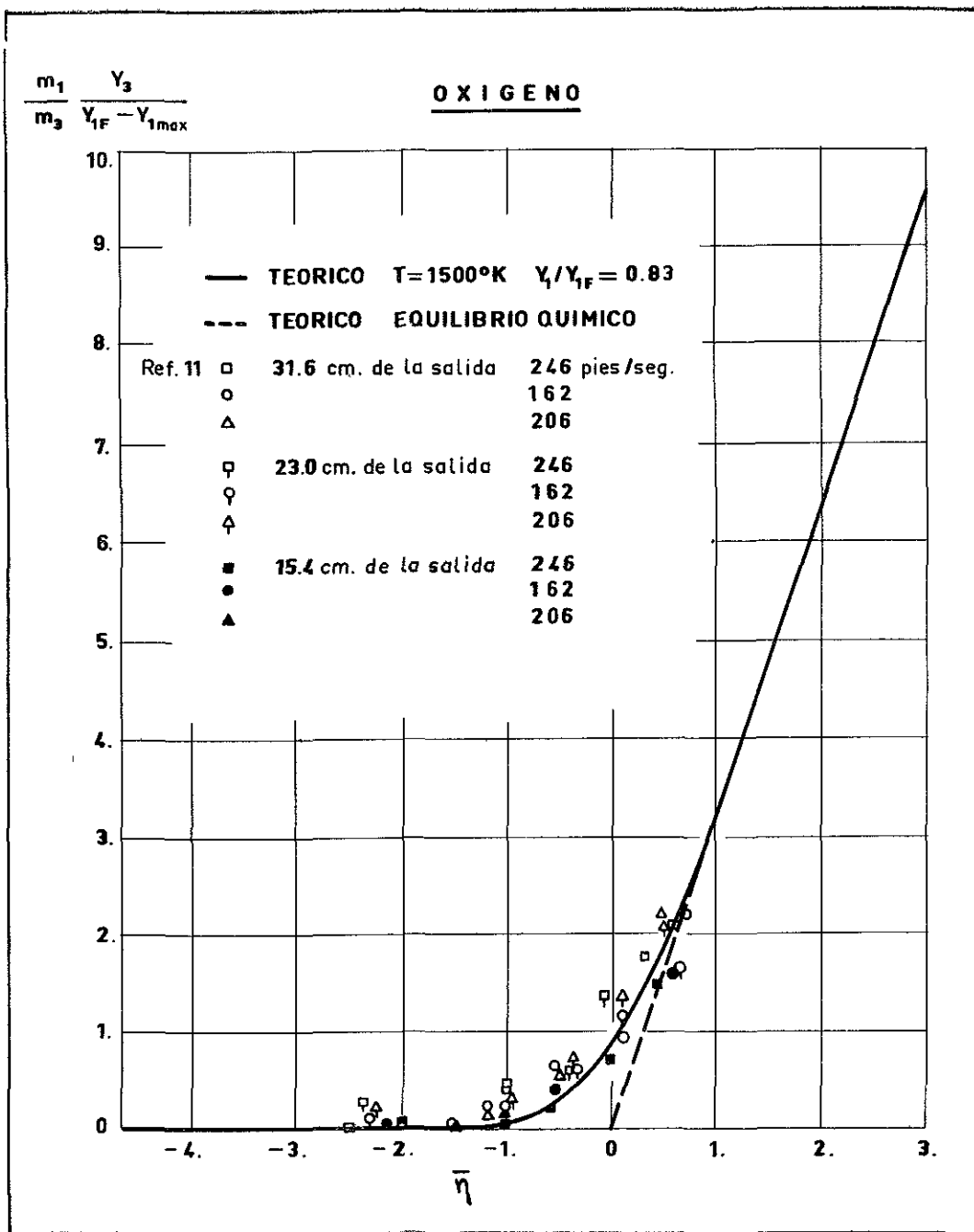


Figura 4

corriente exterior. Cuando se utiliza hidrógeno como combustible, es posible obtener recirculación sin afectar la corriente exterior.

La figura 6, a, obtenida de 11, representa la presión estática medida a lo largo del eje del chorro, cuando no hay inyección y cuando la cantidad de movimiento inyectada $\rho_j u_j$, es pequeña comparada con la de la corriente exterior ($\lambda = \rho_j u_j / \rho_e u_e$). La distribución de presiones cuando no hay inyección, es la que se presenta en las estelas cer-

canas detrás de obstáculos en régimen supersónico. La presión disminuye cerca de la base por efecto de los abanicos de expansión formados cuando las líneas de corriente convergen y se vuelve a elevar por efecto de las ondas de choque que aparecen cuando dichas líneas se acercan al eje del chorro (figura 5, b). El gradiente adverso de presiones produce una recirculación en la estela, debido a que las partículas interiores a la zona de mezcla no tienen suficiente presión total y vuelven hacia atrás. Posteriormente estas partículas son extraídas de la zona

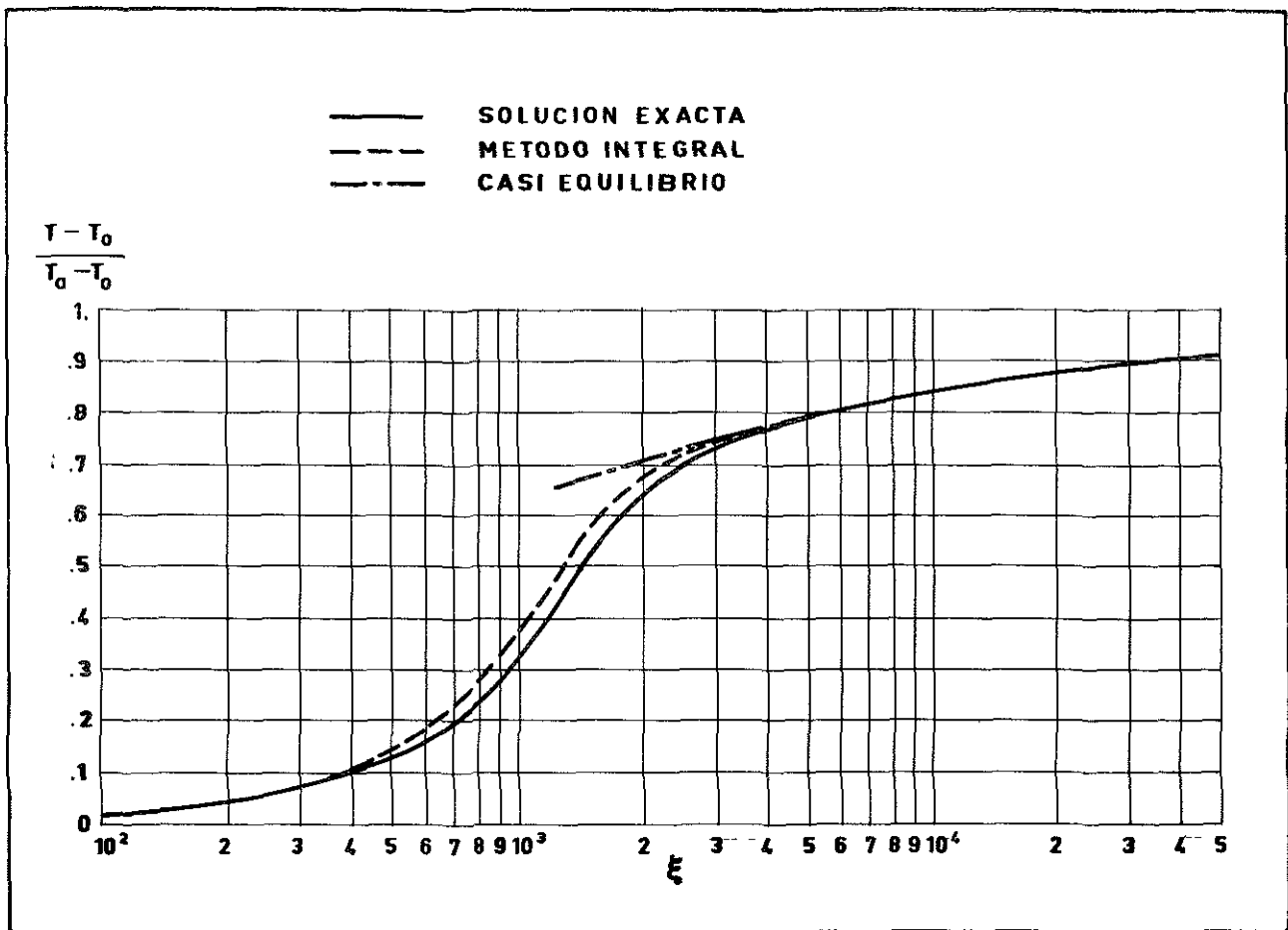


Figura 5

de recirculación por la capa de mezcla, y sustituidas por otras nuevas. Se conoce bien el fenómeno desde el punto de vista cualitativo gracias a los trabajos de Chapman y col.¹³ y Korst y col.¹⁴, y existen teorías que predicen, con razonable aproximación: la presión en la zona de recirculación, distancia de la base al cuello, etc.

La figura 6, a, muestra que cuando λ es pequeño, cosa que parece cierta en la mayoría de los casos cuando el combustible utilizado es hidrógeno, la distribución de presiones y la configuración de la zona exterior de la estela permanece prácticamente inalterable.

Cierta evidencia experimental parece indicar que la configuración de la estela interior es semejante a la esquematizada en la figura 6, c. Cuando la presión total del fluido inyectado es muy pequeña, el chorro de combustible no es capaz de abrirse paso por las proximidades del eje, y se desvía hacia el exterior, mezclándose y recirculando. Al ir aumen-

tando la presión total de inyección, el tamaño de la burbuja de recirculación disminuye muy acusadamente, mientras que la corriente exterior que tiene gran energía cinética es más insensible.

En aquellos casos en que la distancia entre el punto de desprendimiento y el de recompresión es comparable a la longitud de la zona de inducción de la reacción, la recirculación lanza radicales corriente arriba, poniéndolos en contacto directo con el chorro de hidrógeno, y disparando las reacciones rápidas.

La teoría utilizada para estudiar la configuración de esta zona es, esencialmente, la de Korst y colaboradores¹³, que considera: la expansión de la corriente supersónica exterior alrededor del borde del inyector, mezcla turbulenta a presión constante a lo largo del contorno de la estela, recompresión en la garganta y conservación de la masa en el interior. Para estudiar el proceso de mezcla, Korst reduce la ecuación del movimiento a lo largo de la línea de

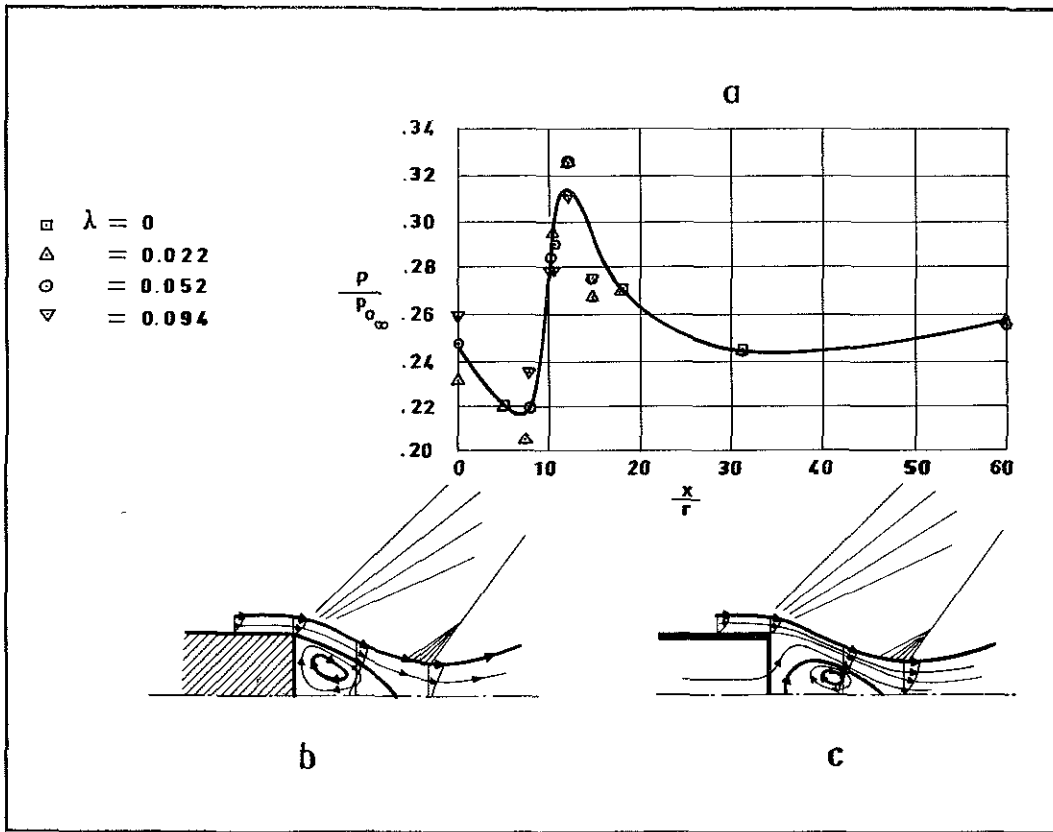


Figura 6

corriente divisoria, por el método de las pequeñas perturbaciones, obteniendo una ecuación análoga a la de conducción del calor. Existe, sin embargo, cierto grado de incertidumbre en el valor de una ve-

locidad media que aparece en la ecuación, cuando las densidades de los dos gases que se mezclan son muy distintas, y tal dificultad sólo puede ser solventada experimentalmente.