

FUNDACION JUAN MARCH

PROGRAMA DE INVESTIGACION

PROBLEMAS DE CONTAMINACION ATMOSFERICA
EN LA COMBUSTION DE HIDROCARBUROS

- - - - -

R E S U M E N

Se exponen en esta Memoria los resultados de un programa de investigación patrocinado por la Fundación Juan March sobre "Combustión atmosférica originada por la combustión de hidrocarburos".

De acuerdo con la Propuesta presentada a la Fundación, se ha centrado especialmente el programa de investigación en el problema de los óxidos de nitrógeno. El programa ha comprendido el aspecto básico del problema: cinética química, estructuras de llamas y formación de óxidos de nitrógeno en las mismas; y un programa fundamentalmente experimental sobre formación de óxidos de nitrógeno en sistemas de combustión continua: cámaras de combustión de motores de reacción y generadores de calor, comprendiendo en este último caso además de los óxidos de nitrógeno los demás contaminantes que se originan en estos sistemas.

En el Capítulo 1° (Introducción) se señalan los principales aspectos de la contaminación atmosférica originada por la combustión de hidrocarburos, discutiéndose a continuación el problema de los óxidos de nitrógeno. Se destaca su importancia a causa de la formación de neblina fotoquímicas o "smog", que se inician con la descomposición del NO_2 por la radiación solar ultravioleta. Se comenta la rápida proliferación mundial de esta contaminación fotoquímica, que se señaló por primera vez en Los Angeles en 1944, y que se forma principalmente en grandes aglomeraciones urbanas con elevada densidad automovilística y que reciban fuerte radiación solar (Los Angeles, Tokyo-Osaka, Sidney, San Francisco, etc). Se discute en el Capítulo el mecanismo de formación del "smog" y los daños que ocasiona.

Finalmente se reseña el programa de investigación, señalándose las razones que motivaron la elección de los temas.

En los sucesivos Capítulos se reseña el programa de investigación realizado incluyendo los resultados y conclusiones. Todos los Capítulos comienzan con una revisión del tema tratado en el mismo y concluyen con una reseña bibliográfica.

En el Capítulo 2° se estudia la cinética química de formación de óxidos de nitrógeno en llamas hidrógeno-aire, discutiéndose la extensión de este mecanismo al caso de hidrocarburos.

El Capítulo 3° está dedicado al estudio de estructuras y temperatura de llamas laminares premezcladas y de difusión y a la formación de óxidos de nitrógeno en ellas, con especial aplicación al caso de combustión de gotas y masas esféricas de gas.

En el Capítulo 4° se expone un programa experimental de formación de óxidos de nitrógeno en cámaras de combustión de turbinas de gas, estudiándose la influencia de diversas variables operacionales y de diseño.

En el Capítulo 5° se expone un programa, principalmente experimental, de los problemas de contaminación (óxidos de nitrógeno, humo, SO₂, CO e hidrocarburos no quemados) en generadores de calor; exponiéndose también un modelo teórico para la correlación de resultados y estudio de problemas transitorios (arranque y parada) y optimización de la regulación (contaminación y consumo) del generador de calor.

En un Anexo (Capítulo 6°) se revisa el tema de la detección remota de contaminantes en la atmósfera.

Finalmente, en el Capítulo 7° se resumen los principales resultados y conclusiones obtenidos en el programa de investigación.

- - - - -

EQUIPO INVESTIGADOR

Director del Programa

Sánchez Tarifa, Carlos

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas".

Catedrático. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Investigadores

Alvaro Fernández, Félix

Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Catedrático. Escuela de Ingeniería Técnica Aeronáutica.

Crespo Martínez, Antonio

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Profesor Adjunto. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Fraga Fernández-Cuevas, Enrique

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Profesor Adjunto. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Liñán Martínez, Amable

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Catedrático. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Salvá Monfort, José

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Profesor Adjunto, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Sanmartín Losada, Juan Ramón

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Catedrático. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Urrutia Pombo, José Luis*

Dr. Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas".

Catedrático. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Colaboradores

Contreras Viñals, Carlos María

Licenciado en Ciencias Físicas. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Gómez Portabella, Francisco

Ingeniero Aeronáutico.

Profesor Encargado de Curso. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Mulero Valenzuela, Manuel

Ingeniero Aeronáutico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Profesor Encargado de Curso. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Santana Góngora, Miguel

Ingeniero Técnico. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Personal Auxiliar Técnico y Administrativo

Aguado Ramirez, Antonio

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

Fernández de Moreda Pablo, Francisca

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

García Fernández, Carlos

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Rabadán Cañada, Ascensión

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

* Dedicamos un sentido recuerdo a la memoria de nuestro compañero José Luis Urrutia Pombo, fallecido durante el desarrollo de este programa de investigación, y cuya labor fue altamente relevante para la realización de estos trabajos.

Rodriguez Almarza, Rafael
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Servert Irigoyen, María Teresa
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

Valero Medina, Juan Manuel
Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas"

- - - - -

El equipo investigador agradece la ayuda prestada al programa por los Drs. Ingenieros Aeronáuticos Antonio Muñoz Torralbo y Manuel Rebollo Rebollo.

El equipo investigador agradece al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas" las facilidades de todo orden que ha dado para el desarrollo de este programa de investigación.

Igualmente agradece la ayuda prestada por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.

- - - - -

I N D I C E

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUCCION	1.1
1.1 El problema de la contaminación atmosférica . .	1.1
1.2 Oxidos de Nitrógeno	1.9
1.3 Programa de Investigación	1.14
2. ESTUDIO DE LA FORMACION DE OXIDOS DE NITROGENO . .	2.1
2.1 Introducción. Antecedentes	2.1
2.2 Combustión de Hidrógeno en aire	2.9
2.3 Discusión	2.35
2.4 Referencias	2.40
3. TEMPERATURAS DE LLAMAS Y FORMACION DE OXIDOS DE NI- TROGENO	3.1
3.1 Introducción	3.1
3.2 Notación del Capítulo	3.6
3.3 Temperaturas de llamas premezcladas y de difu- sión. Modelo del proceso	3.8
3.4 La producción de NO en llamas de difusión . . .	3.27
3.5 Producción de NO en gotas y masas de gas . . .	3.38
3.6 Referencias	3.62
4. OXIDOS DE NITROGENO EN MOTORES DE REACCION Y TURBI- NAS DE GAS	4.1
4.1 Introducción. Situación actual del problema . .	4.1
4.2 Instalación experimental	4.18
4.3 Presentación de resultados	4.57
4.4 Conclusiones	4.70
4.5 Referencias	4.76
ANEXO AL CAPITULO NUM. 4.-	4.87
5. PROBLEMAS DE CONTAMINACION ATMOSFERICA ORIGINADA EN PUENTES ESTACIONARIAS DE COMBUSTION	5.1
5.1 Las fuentes estacionarias de combustión, su in- cidencia en la contaminación atmosférica . .	5.1

Pág.

5.2	Contaminantes típicos de las fuentes fijas . . .	5.9
5.3	Los componentes esenciales de las fuentes fijas de combustible líquido. Definición de un <u>mo</u> <u>delo</u> en planta	5.12
5.4	Efectos de contaminación durante las condicio- nes transitorias	5.31
5.5	Análisis de los gases de combustión. Defini- ción de un método de determinación de la re- lación aire/combustible a partir del análi- sis de gases	5.38
5.6	Estudio experimental del desarrollo de la com- bustión en un generador de calor y sus efec- tos contaminantes	5.46
5.7	Análisis del comportamiento global en estaciona- rio. Definición de un método racional de <u>re</u> <u>gulación</u>	5.92
5.8	Análisis experimental de la planta en régimen transitorio	5.110
5.9	Referencias	5.117
6.	ANEXO.- DETECCION REMOTA DE CONTAMINANTES ATMOSFE- RICOS	6.1
6.1	Introducción	6.1
6.2	Características espectrales de la atmósfera <u>lim</u> <u>pia</u> , y de los contaminantes atmosféricos . .	6.5
6.3	Técnicas de medición	6.10
6.4	Referencias	6.14
7.	CONCLUSIONES (RESUMEN)	7.1



CAPITULO 1º

I N T R O D U C C I O N .

1. INTRODUCCION

1.1 El problema de la contaminación atmosférica

Se presentan en esta Memoria los resultados de un programa de investigación sobre contaminación atmosférica patrocinado por la Fundación Juan March, centrado en el problema de los óxidos de nitrógeno originados en procesos de combustión continua.

En primer lugar, se analizabrevemente algunas particularidades del problema general de la contaminación atmosférica, y en especial, el originado por los óxidos de nitrógeno con objeto de señalar la importancia, particularidades y estado actual del tema de investigación desarrollado.

La contaminación atmosférica y más en general la contaminación del medio ambiente en que vivimos, es una consecuencia directa de una sociedad industrial cuyo número de habitantes está creciendo exponencialmente en los últimos años (Fig.1-1) y cuyo desarrollo industrial ha crecido en muchos países aún en forma más pronunciada, desarrollo que se ha realizado a base de un crecimiento también exponencial del consumo de energía (Fig. 1-1) de tal manera que es un hecho bien conocido que el producto nacional bruto de un país es prácticamente proporcional a su consumo de energía.

Esta energía se obtiene casi totalmente mediante la combustión de combustibles fósiles: hidrocarburos, carbón y gas natural (Cuadro 1-1), y aunque la crisis del petróleo ha acelera-

AUMENTO MUNDIAL DE POBLACION Y DE CONSUMO DE ENERGIA

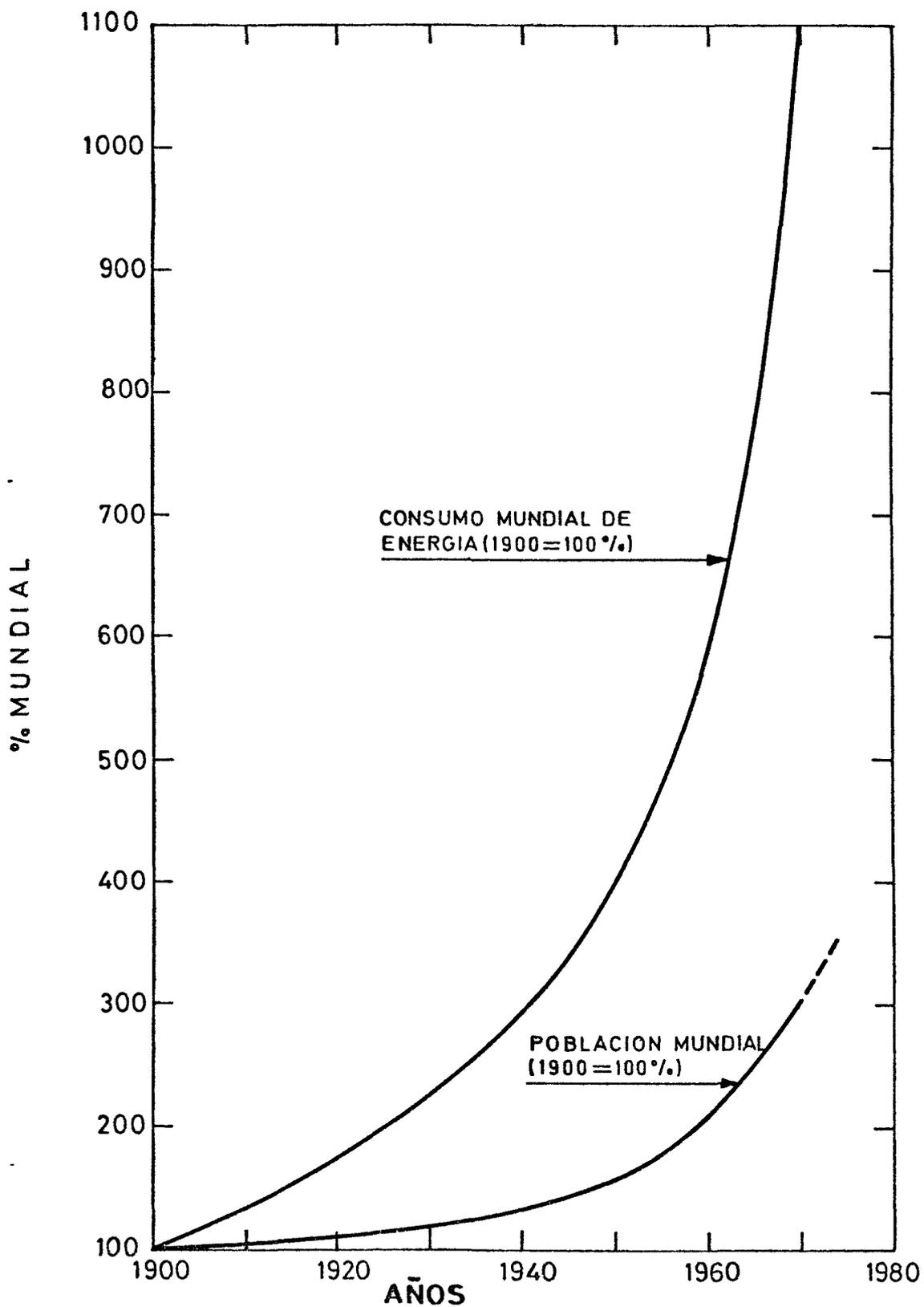


FIG. 1-1

DISTRIBUCION DE LA ENERGIA

1.970

	CARBON	PETROLEO	GAS NATURAL	TOTAL COMBUS. FOSILES	HIDROELECT. + NUCL.	TOTALES
EUROPA OCCIDENTAL	29,4%	53,3%	6,7%	95,4%	4,6%	1457 x 10 ⁶ TEC
AMERICA DEL NORTE	20,1%	41,9%	34,1%	96,1%	3,9%	2468 x 10 ⁶ TEC
JAPON	23,3%	71,4%	1,6%	96,3%	3,7%	373 x 10 ⁶ TEC
RESTO DEL MUNDO	54,6%	31,8%	14,6%	98,4%	1,6%	2584 x 10 ⁶ TEC
% MUNDIAL POR FUENTE DE ENERGIA	34,6%	45,6%	17,5%	97,3%	2,7%	6882 x 10 ⁶ TEC
1.980						
EUROPA OCCIDENTAL	13%	64%	13%	90%	10%	2460 x 10 ⁶ TEC
AMERICA DEL NORTE	18%	42%	30%	90%	10%	2460 x 10 ⁶ TEC
JAPON	14%	75%	3%	92%	8%	889 x 10 ⁶ TEC
RESTO DEL MUNDO	40,5%	39%	18%	97,5%	2,5%	4505 x 10 ⁶ TEC
% MUNDIAL POR FUENTE DE ENERGIA	25%	48%	20%	93%	7%	11871 x 10 ⁶ TEC

do fuertemente la producción de energía nuclear y de otras fuentes de energía (solar, viento y geotérmica principalmente), aún pasarán muchos años durante los cuales los citados combustibles fósiles continuarán constituyendo la principal fuente energética. (Cuadro núm. 1-1).

De estos combustibles, los hidrocarburos (petróleo y gas natural) constituyen la principal fuente de energía y su consumo respecto al del carbón ha aumentado fuertemente en los últimos años (Fig.1-2), aunque es posible que esta tendencia sea alterada por la crisis energética.

La contaminación atmosférica procede en su mayor parte de la combustión de estos combustibles fósiles, produciendo como contaminantes el anhídrido sulfuroso SO_2 , óxidos de nitrógeno NO_x , óxido de carbono CO , hidrocarburos no quemados y aldehídos, humo, cenizas y algunas sustancias nocivas procedentes de aditivos de los combustibles, tales como los compuestos de plomo. El anhídrido carbónico CO_2 no es todavía considerado como contaminante, aunque con el tiempo probablemente habrá que tenerlo en cuenta.

Son bien conocidos los efectos nocivos a corto plazo de estos contaminantes en las concentraciones urbanas o industriales. Por el contrario, están todavía en fase de estudio y discusión los posibles efectos a largo plazo sobre el clima, como en el caso del CO_2 , o bien sobre los efectos de los contaminantes sobre animales y plantas mediante posibles modificaciones de los ciclos ecológicos en que intervienen.

DISTRIBUCION DEL CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA

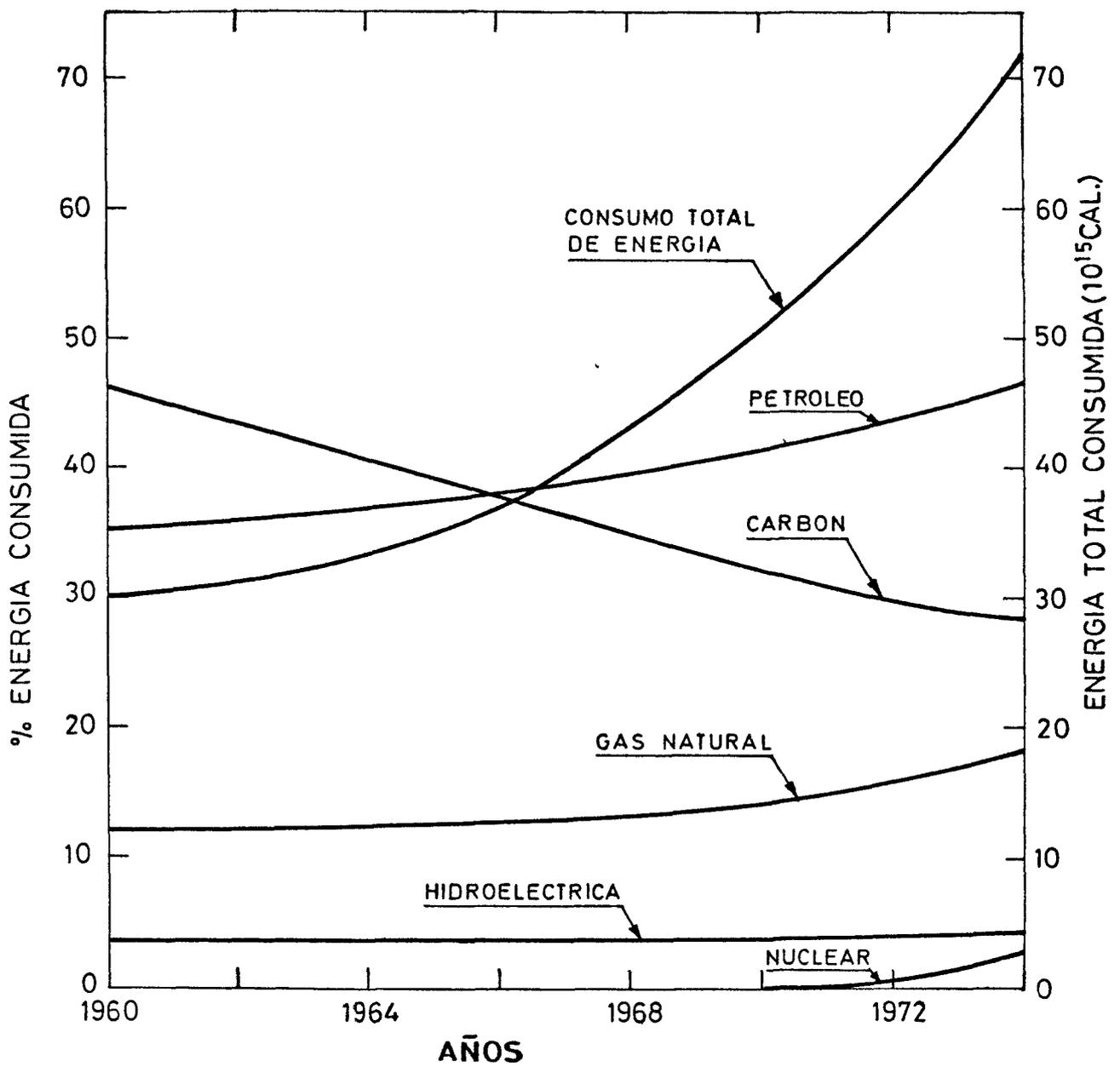


FIG. 1-2

Las principales fuentes de contaminación las constituyen las centrales fijas (centrales térmicas de producción de energía y generadores de calor industriales y domésticos); así como los motores de combustión de los sistemas de propulsión, especialmente los de automoción.

En las centrales fijas se consume carbón, hidrocarburos líquidos y gaseosos. La combustión de estos productos produjo solamente en los países miembros de la OCDE emisiones de unos 90 millones de toneladas de contaminantes en 1972, principalmente en forma de SO_2 , óxidos de nitrógeno, humo y cenizas; y para 1980, y aún tomando medidas importantes para reducir la contaminación, se espera que sobrepasen estas cifras de emisión los 180 millones de toneladas.

El carbón es aún una fuente importante de contaminación, especialmente por el azufre que contiene y que se emite en forma de SO_2 y por el humo y cenizas que origina. Afortunadamente, y de acuerdo con lo mostrado en la Fig.1-2, su consumo disminuye fuertemente en relación con el de hidrocarburos.

Las centrales fijas que utilizan fuel-oil emiten principalmente SO_2 , cenizas y óxidos de nitrógeno, y las que queman combustibles gaseosos no producen prácticamente más contaminantes que los óxidos de nitrógeno.

Es bien conocido el hecho del rápido crecimiento del parque automovilístico en muchos países. Puede citarse, por

ejemplo, que solamente en los Estados Unidos emitieron los auto móviles a la atmósfera en el año 1972 cerca de 180 millones de toneladas de contaminantes en forma de óxido de carbono, óxidos de nitrógeno; hidrocarburos no quemados, compuestos de plomo y partículas carbonosas.

A esta contaminación hay que añadir la originada por los motores de ciclo diesel, que consiste principalmente en óxidos de nitrógeno, humo y pequeñas proporciones de SO_2 y CO .

La emisión contaminante de los automóviles está principalmente concentrada en las ciudades, en las que además los factores de emisión son mayores que en las carreteras. Todo esto hace que en la mayoría de las ciudades constituya el transporte urbano la principal fuente de contaminación, con distribuciones típicas del orden del 70% para el total de con taminantes emitidos; siendo el restante 30% para fuentes estacionarias.

Por el contrario, si se considera la contaminación glo bal en un país, en lo que concierne a SO_2 y a óxidos de nitrógeno, las fuentes estacionarias originan la proporción mayor de contaminantes como se muestra en la Tabla 1-2.

.

T A B L A 1-2

EMISION DE CONTAMINANTES EN ESTADOS UNIDOS
NO_x, SO₂ y partículas sólidas. Datos en millones de Tm.

Año 1972

FUENTE	NO _x	SO ₂	Partículas
Transporte	10,3	1,02	1,5
Fuentes fijas	12,4	29,7	11,0
Procesos industriales	0,24	9,1	9,3

- - - - -

En cambio para el CO, la casi totalidad de este contaminante procede de los motores alternativos.

Otro sistema de transporte cuya contaminación hay que tener en cuenta es la Aviación. Los motores de turbina, turborreactores y turbohélices^(*), de los aviones de transporte, son muy eficientes en comparación con los motores alternativos en cuanto a emisiones de óxido de carbono e hidrocarburos no quemados, ya que sus índices de emisión son prácticamente nulos excepto a bajos regímenes. Por el contrario, sus índices de emisión de óxidos de nitrógeno son importantes y en motores de relación de compresión elevada las cámaras de combustión pueden producir humo, aunque este último problema se ha resuelto en los últimos tipos de motores.

El problema concierne fundamentalmente a los aeropuertos y sus proximidades, en donde se queman cantidades muy

^(*) La contaminación originada por los aviones provistos de motores alternativos carece ya de importancia en la actualidad.

grandes de combustible. Por el contrario, la contribución de la Aviación a la contaminación global es pequeña, al ser también muy pequeña la cantidad de combustible que consume en comparación con el total quemado en el país (del 2% al 3% del total). También es motivo de estudio los posibles efectos a largo plazo sobre el clima y sobre la radiación solar de las emisiones de los aviones supersónicos en la estratosfera.

Como resumen de las diferentes fuentes de contaminación que acaban de discutirse se incluye el cuadro núm. 1-3, en el que se enumeran dichas fuentes y los contaminantes típicos en cada una de ellas.

1.2 Oxidos de Nitrógeno

El tema de la contaminación atmosférica producida por la combustión de hidrocarburos es amplísimo, y es ingente el esfuerzo investigador que actualmente se le dedica; desde los procesos básicos de combustión fluidodinámicos y cinético-químicos que dan origen a la formación de los contaminantes hasta la dispersión, evolución y efectos climáticos y ecológicos; y comprendiendo problemas tan diversos como el estudio de los procesos de emisión en las distintas fuentes, métodos para reducir las emisiones, influencia de los combustibles, efectos biológicos en los seres humanos, animales y plantas, tecnologías de medición, etc. etc. etc.

De acuerdo con lo expuesto en la Memoria que se presenta

tó a la Fundación Juan March, al programa de investigación se ha centrado en los óxidos de nitrógeno, por las razones que allí se expusieron y que serán comentadas de nuevo en este mismo apartado.

CUADRO NUM.1-3

Sistema Combustor	Contaminantes
Centrales Fijas (Combustibles pesados)	SO ₂ , NO _x Humo, cenizas, CO (escaso)
Centrales Fijas (Combustibles gaseosos)	NO _x , CO (escaso)
Motores Alternativos de ignición eléctrica	CO , NO _x , Hidrocarburos no quemados, humo (ocasionalmente), compuestos de plomo.
Motores Alternativos Diesel	NO _x , CO , Hidrocarburos no quemados, humo (ocasionalmente) SO ₂ (escaso)
Turbinas de Gas	NO _x , Humo (ocasionalmente), Hidrocarburos no quemados (escasos) CO (escaso).
Motores de Vapor (Turbinas Rankine)	NO _x .

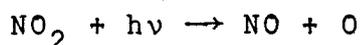
De todos los contaminantes emitidos en la combustión de hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno son los de más difícil eliminación, y por formarse a partir de la reacción del

nitrógeno con el oxígeno, se originan prácticamente en todos los procesos de combustión. Durante la combustión en aire pueden formarse un gran número de óxidos de nitrógeno (N_2O , NO , NO_2 , N_2O_5 , NO_3 , N_2O_4 , etc.), aunque la mayor parte corresponde con mucho al NO y el resto prácticamente a NO_2 .

Durante la dilución de los gases de combustión en la atmósfera, el NO se oxida y se transforma en NO_2 , por lo que la relación de concentraciones NO_2/NO es mucho más elevada en la atmósfera que en los gases de combustión.

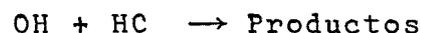
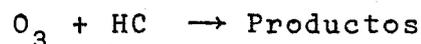
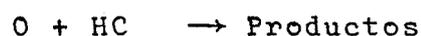
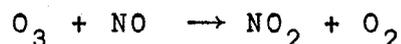
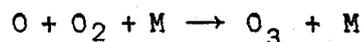
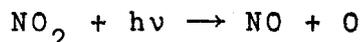
Tanto el NO como el NO_2 son fuertemente tóxicos, especialmente este último, habiéndose observado que concentraciones tan bajas como 9 ppm reducen la función clorofílica en un 60%.

El NO_2 absorbe la luz solar y la radiación ultravioleta en la zona de longitudes de onda de los 3000 a 4000 Anms-trong, en la que existe suficiente energía para disociar el NO_2 mediante la reacción fotoquímica:



El oxígeno atómico así producido reacciona con el oxígeno molecular y produce ozono. Estos potentes oxidantes reaccionan con los compuestos de hidrocarburos típicos de las atmósferas contaminadas originadas por emisiones de vehículos automóviles y generadores de calor, produciéndose numerosos compuestos irritantes fuertemente perjudiciales para la vista, los órganos respiratorios y para las plantas.

El proceso compuesto de fotólisis es extraordinariamente complejo. Un esquema simplificado del mismo es el siguiente:



El conjunto de productos irritantes formados en la atmósfera constituyen las neblinas fotoquímicas o "smog" que comenzaron a notarse en la zona de Los Angeles en 1944, notándose irritación en ojos y garganta y reducción de visibilidad, con posteriores e importantes daños en las cosechas agrícolas. Pronto se extendió el "smog" a otras zonas de California y de los Estados Unidos y actualmente constituye un serio problema en aglomeraciones urbanas tales como Tokyo-Osaka, y en ciudades de Australia (Sidney principalmente) y Europa.

Las zonas típicas de formación del "smog" las constituyen las grandes aglomeraciones urbanas con gran densidad automovilística y con fuerte radiación solar, habiéndose comprobado que existe un tamaño crítico por encima del cual se forman rápidamente las nieblas fotoquímicas. Ultimamente, también está apareciendo el "smog" en zonas con menor radiación solar, tales como Nueva York e incluso en Holanda.

Recientemente, la OCDE convocó unas reuniones de expertos* para tratar el problema de las nieblas fotoquímicas: situación actual en diversos países, mecanismos de formación, efectos de la contaminación fotoquímica, técnicas de medición, métodos de eliminación, etc, etc.

En el informe final se destacó la importancia del tema, y la rápida propagación de estos fenómenos de contaminación fotoquímica al proliferar y crecer en tamaño las aglomeraciones urbanas y la densidad automovilística. En el cuadro núm.1-4, por ejemplo, se incluyen los costes que ocasionan las nieblas fotoquímicas en los Estados Unidos, comparados con el coste total originado por el total de la contaminación atmosférica, pudiendo apreciarse la gran importancia de los mismos.

CUADRO NUM.1-4

DANOS POR CONTAMINACION PRODUCIDOS EN LOS ESTADOS
UNIDOS EN 1970

(Según datos del Council of Environmental Quality.)

DAÑO	COSTE EN MILLONES DE DOLARES		
	NIEBLAS FOTOQUIMICAS	OTROS CONTAMINANTES (SO ₂ , CO, PARTICULAS)	TOTAL
Plantas	118	14	132
Salud pública	45 - 226	17 - 85	62 - 311
Materiales	306 - 1027	414 - 1873	720 - 2900
Animales	4 - 11	1 - 5	5 - 16
Viviendas	114 - 674	445 - 2624	559 - 3298
TOTAL	594 - 2052	1401 - 6682	1995 - 8734

* "Photochemical Air Pollution and its Precursors in the Atmosphere." OCDE NR/ENV/74.16.

Por ello se recomienda en dicho informe el desarrollo de acciones enérgicas para luchar contra este tipo de contaminación y esta es la razón de que en la actualidad se está llevando a cabo un importante esfuerzo investigador sobre el tema de los óxidos de nitrógeno, tanto en problemas básicos de estudio de los procesos de formación de los mismos (cinética química y estructuras de llamas), como en problemas de emisión, eliminación, mecanismos fotoquímicos, sistema de medición, etc, etc.

1.3 Programa de Investigación

El problema de los óxidos de nitrógeno en general es también extraordinariamente extenso, por lo que dentro de este tema se seleccionaron ciertas aéreas de trabajo. Esta selección se efectuó en función de la capacidad del grupo investigador, posibilidades de llevar a cabo un programa experimental y muy en especial también considerando el estado de los problemas y la posibilidad de conseguir aportaciones de importancia.

Este programa de investigación se expone en los apartados siguientes.

1.3.1 *Estudios cinético-químicos sobre la formación de óxidos de nitrógeno.*

Este estudio se llevó a cabo considerando la formación de NO en llamas hidrógeno-aire, para analizar posteriormente

la influencia de la presencia de átomos de carbono en los mecanismos de formación del NO, es decir, aplicando el estudio al caso de los hidrocarburos.

El estudio se llevó a cabo considerando un mecanismo de formación compuesto por 34 reacciones elementales, y estudiando analíticamente la solución del mismo mediante métodos asintóticos; deduciéndose esquemas simplificados de las reacciones en cada etapa del proceso y obteniéndose expresiones analíticas de las velocidades de reacción global.

Los estudios se llevaron a cabo para diferentes rangos de temperaturas y presiones y son de carácter fundamental para su utilización en estudios de carácter aplicado sobre formación de óxidos de nitrógeno en todo tipo de llamas o sistemas de combustión.

Esta parte del programa de investigación se expone en el Capítulo núm. 2.

1.3.2 *Temperaturas de llamas y producción de óxidos de nitrógeno.*

En esta parte del programa se estudiaron las temperaturas de llamas en modelos de difusión y premezcladas, métodos para disminuirlas y formación de óxidos de nitrógeno en las mismas, utilizando para ello modelos cinético-químicos simplificados. Se incluyen también aplicaciones a los casos de combustión de combustibles líquidos en forma de gotas y

combustión de masas esféricas de gas.

Estos estudios proporcionan informaciones muy útiles sobre la formación de óxidos de nitrógeno en sistemas fluidou dinámicos y sobre la manera de controlarlos actuando sobre la temperatura de las llamas, proporcionando orientaciones de tipo cualitativo para el diseño de sistemas combustores encaminados a la reducción de las emisiones de NO.

Estos resultados se exponen en el Capítulo 3°.

1.3.3 *Oxidos de nitrógeno en motores de reacción y turbinas de gas.*

El programa de investigación concerniente a la formau ción de óxidos de nitrógeno en cámaras de combustión de motou res de reacción y turbinas de gas ha sido fundamentalmente de tipo experimental.

Para llevarlo a cabo se montó una instalación de enu sayo de cámaras de combustión continua en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, con sus correspondienu tes equipos de impulsión de aire, alimentación de combustiu bles líquidos y vaporizados e instrumentación. En particular se adquirió un equipo de precisión (de tipo de quimiluminisu cencia) para la medición de óxidos de nitrógeno. También se montó una sonda sónica de nuevo tipo para la medición de comu posiciones de mezclas gaseosas.

En esta instalación experimental se investigaron la

influencia de diversas variables operacionales y de diseño (heterogeneidad o presencia de gotas en la mezcla, relación global aire/combustible, relación aire primario/aire secundario, etc.) en la formación de NO y NO₂. Se obtuvieron conclusiones de importancia que aportan información y datos adicionales para aclarar cuestiones de gran interés, que todavía se debaten, para el diseño de cámaras de combustión de turborreactores y turbinas de gas con vista a la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno, cuestión ésta vital para este tipo de motores.

1.3.4 *Contaminación atmosférica en fuentes estacionarias de combustión.*

Esta parte del programa de investigación ha sido, principalmente, de tipo experimental, aunque se han podido correlacionar diversos resultados mediante un modelo unidimensional del conjunto del generador de calor.

La realización de este programa se ha llevado a cabo en los laboratorios de generadores de calor del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas", excelentemente dotados, que se describen en el Capítulo 5°.

El programa de investigación se ha referido a la contaminación atmosférica originada en generadores de calor, y aunque se ha centrado especialmente en los óxidos de nitrógeno, en este caso también se han estudiados los demás contaminantes: humo, SO₂, hidrocarburos no quemados y CO; ya que las

instalaciones permitían la medición de todos estos contaminantes.

El programa ha comprendido el análisis y estudio de las emisiones en regímenes estacionarios y transitorios (arranque y parada), deduciéndose leyes de correlación con vistas a optimizar la regulación en cuanto a emisiones y rendimiento global del generador.

También se han analizado la formación de contaminantes en el interior del generador mediante mediciones llevadas a cabo con una sonda especialmente desarrollada para el programa, estudiándose las leyes de formación y distribución de las mismas y verificándose diversas conclusiones técnicas.

El programa ha proporcionado valiosa información e importantes conclusiones sobre estos temas, hasta ahora poco conocidos, que se exponen en el Capítulo 5º y en el resumen de las conclusiones finales en el Apartado 7.

1.3.5 *Detección remota de contaminantes.*

Finalmente, y a causa de la novedad e importancia del tema se ha considerado de interés incluir en un Anexo una breve revisión del problema de la detección remota de contaminantes, la cual es particularmente aplicable a la detección de óxidos de nitrógeno.

CAPITULO 2°

ESTUDIO DE LA FORMACION DE OXIDOS DE NITROGENO

2. ESTUDIO DE LA FORMACION DE OXIDOS DE NITROGENO

2.1. Introducción. Antecedentes

La formación y posterior descomposición de los óxidos de nitrógeno en los procesos de combustión en los que interviene el aire como oxidante, estudiada desde un punto de vista teórico, presenta diversas dificultades, debidas principalmente al acoplamiento de los términos de producción química, que obedecen a una cinética química complicada, en las ecuaciones de Navier-Stokes.

Para resolver este problema existen dos métodos; el primero que consiste en formular el problema matemático con todo detalle y encontrar la solución numérica del mismo mediante la ayuda de calculadoras digitales y el segundo que se basa en la elección de un modelo matemático convenientemente simplificado y a partir de él encontrar la solución analítica. El primer método, aunque siempre útil, tiene la desventaja de su poca generalidad, ya que debido a la intervención de gran número de variables y parámetros, los resultados obtenidos para una situación concreta dejan de tener significado en otra situación, por ejemplo, si se cambian las condiciones iniciales. El segundo por el contrario pone de manifiesto en la solución la importancia de los distintos parámetros o variables considerados, lo que permite predecir fenómenos y comportamiento en situaciones no experimentadas con anterioridad.

La mayoría de los trabajos publicados antes de 1967 [ver refs. 2-1, 2-13, 2-26, 2-60] sobre la formación de óxidos de nitrógeno en los vehículos automóviles se limitaban a obtener correlaciones entre las concentraciones medidas en los gases de escape y las condiciones de operación del motor, tales como, relación aire-combustible, avance al encendido, revoluciones del motor, presión de salida etc. De estos estudios se dedujeron resultados cualitativos respecto a la formación de los óxidos de nitrógeno y a partir de ellos se supo, por ejemplo, que se obtenían mayores concentraciones de óxidos de nitrógeno en el escape al aumentar la temperatura máxima del ciclo o a medida que era mayor la concentración de oxígeno en los gases quemados, observándose asimismo que los niveles de óxidos de nitrógeno en los gases de escape correspondían más a la concentración de equilibrio en las condiciones de la temperatura máxima del ciclo que en las relativas al escape. Estas estimaciones analíticas unidas al hecho, plenamente aceptado en la actualidad de que los óxidos de nitrógeno producidos por los vehículos automóviles son la mayor fuente de contaminación de la atmósfera por este tipo de óxidos promovió un gran interés sobre este tema. Así Newhall y Starkman²⁻⁴³ en 1967, para explicar las concentraciones de NO en los gases de escape superiores a las correspondientes al estado de equilibrio, propusieron un esquema cinético simplificado basado en el modelo de Zeldovich, utilizando la hipótesis

adicional de que los átomos de oxígeno y nitrógeno en la mezcla reactante se encontraban en todo momento en estado de equilibrio parcial con las respectivas moléculas, pudiendo de esta forma predecir que las especies químicas quedaban congeladas en las condiciones de equilibrio correspondientes a la temperatura máxima del ciclo; aún cuando el modelo e hipótesis utilizadas no tenían más justificación que el resultado obtenido válido en esas condiciones y no en circunstancias más generales.

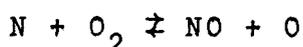
Basados en resultados experimentales en 1970 Lavoie, Heywood y Keck²⁻³³ establecieron un esquema cinético apropiado para estudiar la evolución de los óxidos de nitrógeno tanto en su proceso de formación como en su posible descomposición y en las condiciones apropiadas al caso de los motores de combustión interna; el esquema propuesto fue el siguiente:

- 1) $N + NO \rightleftharpoons N_2 + O$
- 2) $N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$
- 3) $N + OH \rightleftharpoons NO + H$
- 4) $H + N_2O \rightleftharpoons N_2 + OH$
- 5) $O + N_2O \rightleftharpoons N_2 + O_2$
- 6) $O + N_2O \rightleftharpoons NO + NO$

Aún con este esquema cinético, ciertamente simplificado, las ecuaciones de evolución eran lo suficientemente complicadas co

mo para impedir cualquier tipo de solución analítica exacta. La-voie simplificó el problema considerando que las especies O, O₂, H, y H₂ se encontraban en equilibrio y utilizó la hipótesis de estado estacionario para el nitrógeno atómico y la especie N₂O.

Bowman²⁻⁸, realizó en 1970 una investigación sobre la cinética de la formación de los óxidos de nitrógeno en procesos de combustión, con particular énfasis en la reacción H₂-O₂-N₂, utilizando un esquema cinético que incluía 32 reacciones elementales. Comparando los resultados obtenidos al resolver numéricamente sus ecuaciones con resultados experimentales apropiados (2150°K < T < 2800°K, p = 2.2 atm) observó que el esquema cinético apropiado a sus condiciones, para estudiar la formación de óxidos de nitrógeno podía reducirse al esquema de Zeldovich,

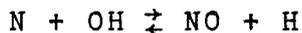
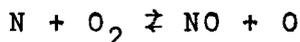


La aplicación del esquema de Bowman en condiciones experimentales distintas a las por él empleadas condujo a velocidades de formación de NO sustancialmente más baja que las observadas experimentalmente. La explicación encontrada por Bowman se cifraba en el hecho de que en muchos procesos de combustión la concentración de átomos de oxígeno pudiera alcanzar valores muy por encima de los correspondientes al equilibrio y, por lo tanto, si se utilizaba su esquema junto con la hipótesis de concentracio-

nes de equilibrio, en particular para los átomos de oxígeno, los resultados que se obtendrían a concentraciones de NO más bajos que los reales.

Más tarde Caretto²⁻¹⁶ en 1971, utilizó el esquema de Lavoie en el estudio de las emisiones de óxidos de nitrógeno tanto en motores de combustión interna como en turbinas de gas, observando que el mecanismo de formación de NO, de Zeldovich, resultaba insuficiente para hacer ninguna predicción razonable, excepto, quizás para el caso de mezclas pobres.

Westenberg²⁻⁵⁹, en su estudio realizado en 1971 sobre la formación de óxidos de nitrógeno en condiciones apropiadas a las turbinas de gas, propuso como únicas reacciones elementales que podían jugar un papel relevante en dicha formación de NO, las siguientes:



es decir, las tres primeras reacciones elementales del esquema cinético de Lavoie. La resolución del problema matemático correspondiente la simplificaba Westenberg invocando la hipótesis de estado estacionario para la concentración de nitrógeno atómico sobre la base de que "es un procedimiento standard para el tratamiento de mezclas reactantes complejas, legítimo siempre que una

especie esté presente en cantidades pequeñas comparadas a las especies de interés". Considerando el esquema completo de Lavoie, Westenberg establecía que la inclusión de las tres restantes reacciones resultaba arriesgado por no conocerse bien los valores de las correspondientes velocidades de reacción.

Marteney²⁻³⁹ ha realizado también estudios analíticos de la cinética de formación de óxidos de nitrógeno en la combustión de hidrocarburos en el aire. Las condiciones relevantes en su estudio eran una temperatura a la entrada de la cámara de combustión que variaba entre 1000 y 2000°K a unas presiones entre 1 y 10 atmósferas con distintas estequiometrías. Los resultados de su análisis demostraron que los óxidos de nitrógeno alcanzaban el equilibrio más lentamente en relación con el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio de los óxidos de carbono e hidrógeno. La implicación de este resultado en relación con las observaciones de concentraciones de óxidos de nitrógeno en los gases quemados es que los valores de estas concentraciones por debajo de los correspondientes al equilibrio están relacionados con la cinética de formación de óxidos, así como que los factores dominantes en los niveles de NO en los gases quemados en el escape, están más relacionados con la temperatura de combustión y con los tiempos de residencia en la cámara de combustión que con las temperaturas en el escape.

Otros estudios recientes sobre el mecanismo de formación

de los óxidos de nitrógeno realizados por distintos investigadores indican que, en las proximidades de la zona de combustión, la velocidad de formación del óxido de nitrógeno excede la que se deriva de adoptar el mecanismo de Zeldovich para la formación de dicho óxido. La aparición de este óxido de nitrógeno rápidamente formado, denominado "NO súbito" (prompt NO) por Fenimore, ha sido explicada de distintas maneras. Por ejemplo, Fenimore²⁻²³ atribuye el "NO súbito" a reacciones distintas a las de Zeldovich mientras que otros investigadores concluyen que esta formación rápida de NO es consistente con dicho esquema y, en consecuencia, de que los radicales están fuera del equilibrio en la vecindad de la zona de combustión. En un trabajo reciente Sarofim y Pohl²⁻⁴⁹ llegaron a conclusiones análogas a las de Bowman, sin embargo Iverach y otros²⁻³⁰ han encontrado resultados que corroboran las conclusiones de Fenimore.

En este trabajo se estudia analíticamente la formación de NO en los procesos de combustión de Hidrógeno en Aire. El estudio se lleva a cabo tratando asintóticamente un esquema cinético compuesto por un amplio número de reacciones elementales obtenido de la literatura existente en este tema. El tratamiento, asintótico, se basa en que las constantes de reacción de algunas de las reacciones elementales difieren entre sí en varios órdenes de magnitud. Por otra parte, las velocidades de reacción dependen no sólo de dichas constantes sino también de las concentraciones de las especies reactantes y éstas varían sustancialmente a lo largo del proceso de combustión. Así pues

aparecerán diversas etapas en el proceso, en las que las reacciones elementales dominantes serán diferentes, por lo que el estudio asintótico es del tipo denominado de perturbaciones singulares. Un estudio semejante ha sido aplicado por Liñán y Urrutia²⁻³⁶ en la combustión hidrógeno aire en corriente supersónica, y por Urrutia²⁻⁵⁸ y por Sanmartín²⁻⁴⁸ a la descomposición térmica de la hidracina. Para separar la cinética química de la combustión de los fenómenos fluidodinámicos, usualmente asociados, se considera un proceso espacialmente uniforme, isotermo y a presión constante.

Como las constantes de reacción dependen, en general, muy sensiblemente de la temperatura serán necesarios diferentes desarrollos asintóticos para diferentes temperaturas. En cambio, la dependencia con la presión es mucho más débil lo que hace innecesario considerar separadamente distintos valores de ésta.

En la mayoría de los casos analizados se encuentra que después de varias etapas preliminares, generalmente de pequeña duración, en las que se generan especie intermedias, se alcanza una etapa final que abarca la mayor parte del proceso y en la cual dichas especies intermedias se encuentran en estado cuasi-estacionario. En esta etapa se obtienen expresiones analíticas para la estequiometría (y, por tanto, para el calor de reacción), velocidad de reacción y velocidad de formación del NO; tales expresiones globales dependen solamente de la presión, temperatura,

relación inicial aire/combustible y concentración instantánea del combustible (y del NO para su velocidad de formación).

Aún cuando el objetivo fundamental de este trabajo son los antes citados resultados globales, también permite determinar cuando las especies intermedias alcanzan el estado cuasi-estacionario; además, en los casos en que este estado no se alcanza, el trabajo demuestra la no existencia de resultados globales.

Por otra parte, los resultados aquí obtenidos para procesos isoterms pueden aplicarse al caso de combustión adiabática, en la hipótesis de que los tiempos requeridos para alcanzar el citado estado estacionario sean mucho más cortos que los tiempos característicos de variación de temperatura.

En este capítulo se estudiará la formación de NO en el caso de combustión de Hidrógeno-aire.

2.2 Combustión de Hidrógeno en aire

Para este estudio debido a que la temperatura de la llama adiabática del hidrógeno es mucho más alta que la de los hidrocarburos se han considerado tres intervalos de temperatura alrededor de 1000, 2000 y 3000°K. En cuanto a la presión, el análisis se ha realizado considerando valores entre 3 y 40 atmósferas, por ser los valores operacionales de las turbinas de gas.

Se han considerado 34 reacciones elementales como integrantes del mecanismo cinético, para la combustión del hidrógeno en aire; siendo un esquema muy similar al utilizado por Bowman.

En la Tabla I aparecen las citadas reacciones así como sus constantes de reacción.

Si N_i es el número de moles de la especie i y V el volumen del sistema, la ecuación de evolución para cada especie viene dada por

$$\frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \sum_j r_j^i \quad (2-1)$$

donde r_j^i es la velocidad de formación de la especie i debida a la reacción j . Como se sabe para una mezcla de gases ideales a presión y temperatura constantes,

$$\frac{d\{N_i/V\}}{dt} \equiv \frac{dn_i}{dt} = \sum_j r_j^i - \frac{n_i}{n_T} \sum_{i',j'} \sum_{d'} r_{d'}^{i'} \quad (2-2)$$

donde $n_T \equiv \sum_i n_i$.

El sistema de ecuaciones (2-2) debe resolverse con las condiciones iniciales

$$n_{H_2} = (n_{H_2})_0 \quad n_{O_2} = (n_{O_2})_0 \quad n_{N_2} = (n_{N_2})_0 \quad (2-3)$$

y $(n_i)_0 = 0$ para las demás especies.

TABLA I

$$K = AT^B \exp - \left(\frac{E}{RT} \right)$$

reaccion	directo			inverso			referencia
	A	B	E	A	B	E	
1 H ₂ + OH ⇌ H ₂ O + H	2.19 × 10 ¹³	0	5150	4.858 × 10 ¹⁴	.2	20727	Baulch
2 O ₂ + H ⇌ OH + O	2.24 × 10 ¹⁴	0	16800	6.647 × 10 ¹¹	.39	-469	"
3 H ₂ + O ⇌ OH + H	1.74 × 10 ¹³	0	9450	7.737 × 10 ¹²	0	7467	"
4 H ₂ O + O ⇌ OH + OH	5.75 × 10 ¹³	0	18000	1.169 × 10 ¹²	.2	-444	"
5 H + H + M → H ₂ + M	5 × 10 ¹⁸	-1.15	0	-	-	-	
6 O + O + M → O ₂ + M	4.7 × 10 ¹⁵	-.28	0	-	-	-	
7 O + H + M → OH + M	5.3 × 10 ¹⁵	0	-2780	-	-	-	
8 H + OH + M → H ₂ O + M	1.17 × 10 ¹⁷	0	0	-	-	-	
9 H ₂ + O ₂ ⇌ 2OH	2.5 × 10 ¹²	0	39300	-	-	-	Bowman
10 NO + N ⇌ N ₂ + O	3 × 10 ¹³	0	334	6.19 × 10 ¹³	.1	75241	Baulch
11 NO + O ⇌ N + O ₂	3.66 × 10 ⁸	1.16	37847	6.43 × 10 ⁹	1	6250	"
12 NO + NO ⇌ N ₂ O + O	10 ¹⁴	0	76600	2.5 × 10 ¹³	0	27080	"
13 NO + M ⇌ N + O + M	4 × 10 ²⁰	-1.5	150000	4.49 × 10 ¹⁸	-1.16	-2000	"
14 N ₂ O + H ⇌ N ₂ + OH	3 × 10 ¹³	0	5420	-	-	-	Schofield
15 N + OH ⇌ NO + H	4 × 10 ¹³	0	0	-	-	-	Campbell
16 O + N ₂ O ⇌ N ₂ + O ₂	3.61 × 10 ¹³	0	24168	-	-	-	Prud'homme
17 N ₂ + M ⇌ N + M + M	7 × 10 ¹⁹	-1	226600	-	-	-	

De la conservación del número de átomos de O, N y H se deducen dos relaciones integrales (es de notar que V no es constante):

$$\frac{2n_{H_2} + 2n_{H_2O} + n_H + n_{OH}}{2n_{N_2} + 2n_{N_2O} + n_N + n_{NO}} = \frac{(n_{H_2})_0}{(n_{N_2})_0} \quad (2-4)$$

$$\frac{2n_{O_2} + n_{H_2O} + n_O + n_{OH} + n_{N_2O} + n_{NO}}{2n_{N_2} + 2n_{N_2O} + n_N + n_{NO}} = \frac{(n_{O_2})_0}{(n_{N_2})_0}$$

De la constancia de la presión y temperatura se deduce una tercera relación integral

$$\sum n_i = (n_T)_0 \quad (2-5)$$

Si tenemos en cuenta las ecuaciones (2-4) y (2-5) sólo se necesitan siete ecuaciones del sistema (2-2), por ejemplo, las correspondientes a las especies O, H, OH, H₂O, N, NO y N₂O.

Las ecuaciones precedentes pueden hacerse adimensionales definiendo

$$x_i = \frac{n_i}{n_T}, \quad \tau = n_T K_{2in} t, \quad k_j = \frac{K_j}{K_{2in}} \quad (2-6)$$

obteniéndose el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} \frac{dx_0}{d\tau} = & \{k_{2d}x_{O_2}x_H - x_{OH}x_0\} - \{k_{3d}x_{H_2}x_0 - k_{3i}x_{OH}x_H\} - \{k_{4d}x_{H_2O}x_0 - k_{4i}x_{OH}^2\} \\ & - 2k_{6d}n_Tx_0^2 - \{k_{7d}n_Tx_0x_H - k_{7i}x_{OH}\} + \{k_{10d}x_{NO}x_N - k_{10i}x_{N_2}x_0\} \\ & - \{k_{11d}x_{NO}x_0 - k_{11i}x_{O_2}x_N\} + \{k_{12d}x_{NO}^2 - k_{12i}x_{N_2O}x_0\} \\ & + \{k_{13d}x_{NO} - k_{13i}n_Tx_0x_N\} - k_{16d}x_0x_{N_2O} - x_0^\sigma \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_H}{d\tau} = & \{k_{1d}x_{H_2}x_{OH} - k_{1i}x_{H_2O}x_H\} - \{k_{2d}x_{O_2}x_H - x_{OH}x_0\} + \{k_{3d}x_{H_2}x_0 - k_{3i}x_{OH}x_H\} \\ & - 2\{k_{5d}n_Tx_H^2\} - \{k_{7d}n_Tx_0x_H - k_{7i}x_{OH}\} - \{k_{8d}n_Tx_Hx_{OH} - k_{8i}x_{H_2O}\} \\ & - \{k_{14d}x_{N_2O}x_H - k_{14i}x_{N_2}x_{OH}\} + \{k_{15d}x_Nx_{OH} - k_{15i}x_{NO}x_H\} - x_H^\sigma \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{OH}}{d\tau} = & -\{k_{1d}x_{H_2}x_{OH} - k_{1i}x_{H_2O}x_H\} + \{k_{2d}x_{O_2}x_H - x_{OH}x_0\} \\ & + \{k_{3d}x_{H_2}x_0 - k_{3i}x_{OH}x_H\} + 2\{k_{4d}x_{H_2O}x_0 - k_{4i}x_{OH}^2\} + \{k_{7d}n_Tx_0x_H - k_{7i}x_{OH}\} \\ & - \{k_{8d}n_Tx_Hx_{OH} - k_{8i}x_{H_2O}\} + 2\{k_{9d}x_{H_2}x_{O_2} - k_{9i}x_{OH}^2\} \\ & + \{k_{14d}x_{N_2O}x_H - k_{14i}x_{N_2}x_{OH}\} - \{k_{15d}x_Nx_{OH} - k_{15i}x_{NO}x_H\} - x_{OH}^\sigma \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{H_2O}}{d\tau} = & \{k_{1d}x_{H_2}x_{OH} - k_{1i}x_{H_2O}x_H\} - \{k_{4d}x_{H_2}x_0 - k_{4i}x_{OH}^2\} \\ & + \{k_{8d}n_Tx_Hx_{OH} - k_{8i}x_{H_2O}\} - x_{H_2O}^\sigma \end{aligned}$$

$$\frac{dx_N}{d\tau} = -\{k_{10d}x_{NO}x_N - k_{10i}x_{N_2}x_0\} + \{k_{11d}x_{NO}x_0 - k_{11i}x_Nx_{O_2}\}$$

$$+ \{k_{13d}x_{NO} - k_{13i}n_T x_O x_N\} - \{k_{15d}x_N x_{OH} - k_{15i}x_{NO} x_H\} - 2k_{17i}n_T x_N^2 - x_N \sigma .$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{NO}}{d\tau} = & - \{k_{10d}x_{NO}x_N - k_{10i}x_{N_2}x_O\} - \{k_{11d}x_{NO}x_O - k_{11i}x_N x_{O_2}\} \\ & - 2\{k_{12d}x_{NO}^2 - k_{12i}x_{N_2}x_O x_O\} - \{k_{13d}x_{NO} - k_{13i}n_T x_O x_N\} \\ & + \{k_{15d}x_N x_{OH} - k_{15i}x_{NO} x_H\} - x_{NO} \sigma . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_{N_2O}}{d\tau} = & \{k_{12d}x_{NO}^2 - k_{12i}x_{N_2}x_O x_O\} - \{k_{14d}x_{N_2}x_O x_H - k_{14i}x_{N_2}x_{OH}\} \\ & - k_{16d}x_{N_2}x_O x_O - x_{N_2O} \sigma . \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\frac{2x_{H_2O} + 2x_{H_2} + x_H + x_{OH}}{2x_{N_2} + 2x_{N_2O} + x_N + x_{NO}} = \frac{(x_{H_2})_o}{(x_{N_2})_o}$$

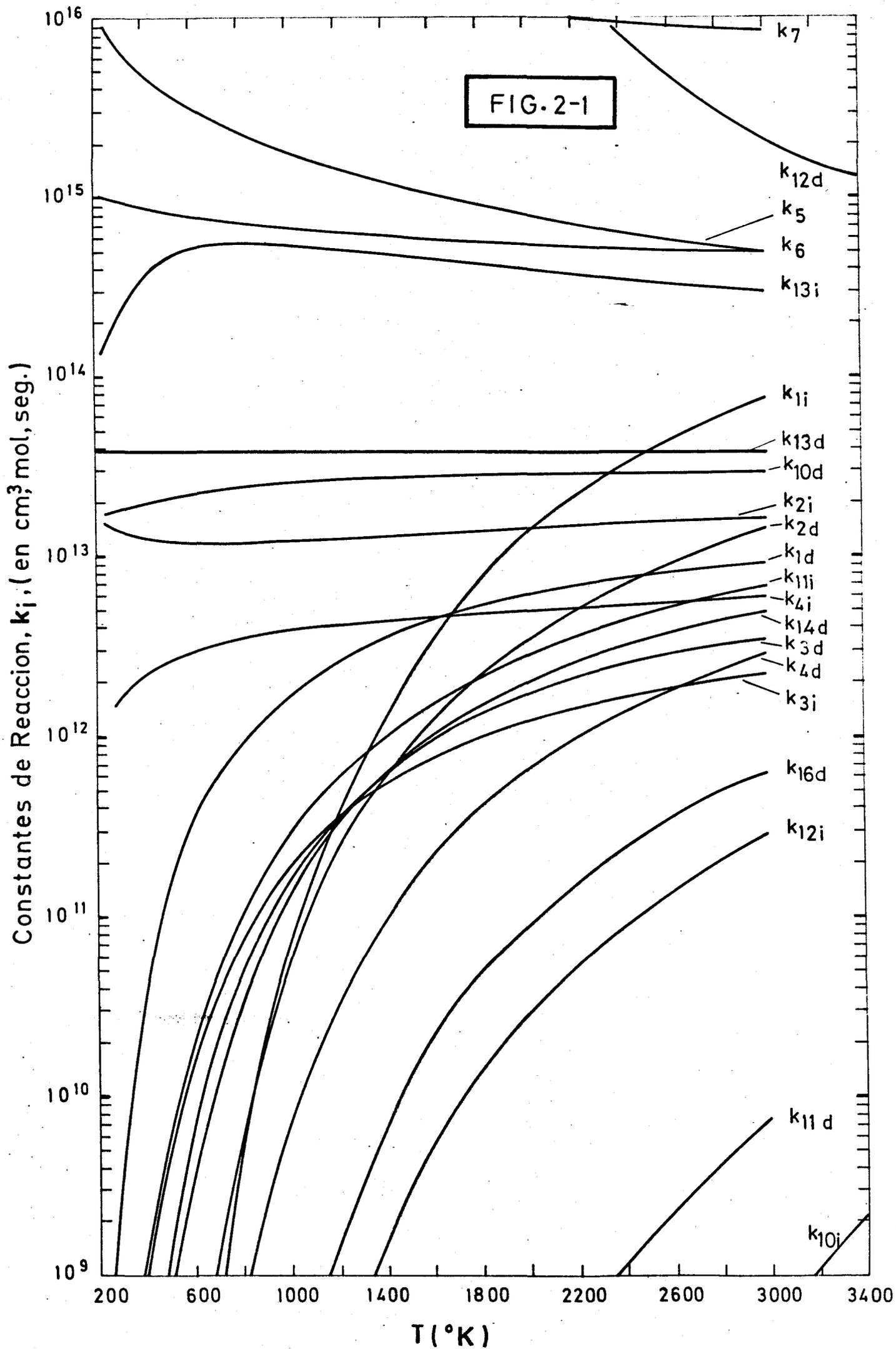
$$\frac{2x_{O_2} + x_{H_2O} + x_O + x_{OH} + x_{N_2O} + x_{NO}}{2x_{N_2} + 2x_{N_2O} + x_N + x_{NO}} = \frac{(x_{O_2})_o}{(x_{N_2})_o}$$

$$\Sigma x_i = 1 \quad (2-8)$$

$$\text{donde } \sigma = (n_T^2 K_{2in})^{-1} \sum_i \sum_j r_j^i .$$

De la observación de la Fig. 2-1 se deduce que las constantes de reacción k_j difieren unas de otras en varios órdenes de magnitud. Este hecho permite introducir en las ecuaciones (2-7) y

FIG. 2-1



(2-8) un parámetro pequeño ϵ (que se ha tomado 10^{-2}) y de esta forma expresar todas las k_j en potencias de ϵ . En el desarrollo asintótico que se realiza a continuación se hará tender ϵ a cero aún cuando al final del análisis y para aplicaciones numéricas se pondrá $\epsilon = 10^{-2}$. En lo que respecta a $(x_{H_2})_0$, $(x_{O_2})_0$ y $(x_{N_2})_0$ se supondrán del orden de la unidad.

I) Formación de NO para $T \sim 1000^\circ K$

En este caso y en los posteriores se ha tomado $p \approx 12$ atm, dado que por la débil dependencia del sistema (2-7) con la presión, los resultados de los desarrollos asintóticos para este valor son válidos para el intervalo de p antes expresado.

En estas condiciones se tiene

$$n_T = O(\epsilon^2) \quad (2-9)$$

y

$k_{1d} = O(\epsilon^{0.5})$	$K_{1i} = O(\epsilon^{1.5})$
$k_{2d} = O(\epsilon^{1.5})$	$k_{2i} = O(1)$
$k_{3d} = O(\epsilon)$	$k_{3i} = O(\epsilon)$
$k_{4d} = O(\epsilon^2)$	$k_{4i} = O(\epsilon^{0.5})$
$k_{5d} = O(\epsilon^{-1})$	_____
$k_{6d} = O(\epsilon^{-0.5})$	_____
$k_{7d} = O(\epsilon^{-1.5})$	_____

$$\begin{array}{ll}
k_{8d} = 0(\epsilon^{-2}) & \text{-----} \\
k_{9d} = 0(\epsilon^5) & \text{-----} \\
k_{10d} = 0(1) & k_{10i} = 0(\epsilon^8)^{-} \\
k_{11d} = 0(\epsilon^5) & k_{11i} = 0(\epsilon) \\
k_{12d} = 0(\epsilon^8) & k_{12i} = 0(\epsilon^3) \\
k_{13d} = 0(\epsilon^{15}) & k_{13i} = 0(\epsilon^{-1}) \\
k_{14d} = 0(\epsilon^{0.5}) & k_{14i} = 0(\epsilon^{8.5}) \\
k_{15d} = 0(\epsilon^{0.5}) & k_{15i} = 0(\epsilon^5) \\
k_{16d} = 0(\epsilon^{2.5}) & \text{-----}
\end{array} \quad (2-10)$$

Inicialmente ($\tau = 0$) todas las x_i son nulas excepto para $i = H_2, O_2, N_2$. Del conjunto de ecuaciones (2-7) a (2-10) se obtiene, para τ suficientemente pequeño y reteniendo sólo términos dominantes, el siguiente sistema

$$\begin{array}{ll}
\frac{dx_0}{d\tau} \approx k_{2d} x_{O_2} x_H & \frac{dx_N}{d\tau} \approx k_{10i} x_{N_2} x_O \\
\frac{dx_H}{d\tau} \approx k_{1d} x_{H_2} x_{OH} & \frac{dx_{NO}}{d\tau} \approx k_{10i} x_{N_2} x_O \\
\frac{dx_{OH}}{d\tau} \approx 2k_{9d} x_{H_2} x_{O_2} & \frac{dx_{N_2O}}{d\tau} \approx k_{14i} x_{N_2} x_{OH} \\
\frac{dx_{H_2O}}{d\tau} \approx k_{1d} x_{H_2} x_{OH} &
\end{array} \quad (2-11)$$

de donde

$$\begin{aligned}
 x_{\text{O}} &= 0(\varepsilon^7 \tau^3) & x_{\text{N}} &= 0(\varepsilon^{15} \tau^4) \\
 x_{\text{H}} &= 0(\varepsilon^{5.5} \tau^2) & x_{\text{NO}} &= 0(\varepsilon^{15} \tau^4) \\
 x_{\text{OH}} &= 0(\varepsilon^5 \tau) & x_{\text{N}_2\text{O}} &= 0(\varepsilon^{13.5} \tau^2) \\
 x_{\text{H}_2\text{O}} &= 0(\varepsilon^{5.5} \tau^2) & &
 \end{aligned} \tag{2-12}$$

mientras que x_{H_2} , x_{O_2} y x_{N_2} permanecen invariables.

Los resultados precedentes describen lo que podría llamarse etapa "cero" o de arranque de la reacción. Al crecer x_i con el tiempo, del orden de magnitud de algunos términos de las ecuaciones del sistema (2-7) cambian y estos se hacen dominantes lo que conduce a un nuevo análisis asintótico que corresponde a una nueva etapa de la reacción.

Primera etapa

Para $\tau = 0(\varepsilon^{-1/2})$ aparece esta primera etapa, en la que la única modificación consiste en que la ecuación para x_{OH} toma la forma

$$\frac{dx_{\text{OH}}}{d\tau} \approx -k_{1d} x_{\text{H}_2} x_{\text{OH}} + 2k_{9d} x_{\text{H}_2} x_{\text{O}_2} \tag{2-13}$$

se puede comprobar fácilmente que para $\tau \gg \varepsilon^{-1/2}$ se tiene $x_{\text{OH}} = 0(\varepsilon^{4.5})$ y por tanto

$$\begin{aligned}
 x_O &= O(\epsilon^6 \cdot 5\tau^2) & x_N &= O(\epsilon^{14} \cdot 5\tau^3) \\
 x_H &= O(\epsilon^5\tau) & x_{NO} &= O(\epsilon^{14} \cdot 5\tau^3) \\
 x_{H_2O} &= O(\epsilon^5\tau) & x_{N_2O} &= O(\epsilon^{13}\tau)
 \end{aligned} \tag{2-14}$$

Segunda etapa

Para $\tau = O(\epsilon^{-1})$ las ecuaciones para x_O , x_N , y x_{NO} toman la forma

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_O}{d\tau} &\approx k_{2d}x_{O_2}x_H - k_{3d}x_{H_2}x_O \\
 \frac{dx_N}{d\tau} &\approx k_{10i}x_{N_2}x_O - k_{11i}x_{O_2}x_N \\
 \frac{dx_{NO}}{d\tau} &\approx k_{10i}x_{N_2}x_O + k_{11i}x_{O_2}x_N
 \end{aligned} \tag{2-15}$$

La especie OH se encuentra ya en estado estacionario dado por

$$0 \approx -k_{1d}x_{H_2}x_{OH} + 2k_{9d}x_{H_2}x_{O_2} \tag{2-16}$$

no sufriendo modificación las ecuaciones para las otras especies. Se tiene, entonces, para $\tau \gg \epsilon^{-1}$

$$\begin{aligned}
 x_O &= O(\epsilon^5 \cdot 5\tau) & x_H &= O(\epsilon^5\tau) & x_{OH} &= O(\epsilon^4 \cdot 5) & x_{H_2O} &= O(\epsilon^5\tau) \\
 x_N &= O(\epsilon^{12} \cdot 5\tau) & x_{NO} &= O(\epsilon^{13} \cdot 5\tau) & x_{N_2O} &= O(\epsilon^{13}\tau)
 \end{aligned} \tag{2-17}$$

Tercera etapa

Para $\tau = 0(\epsilon^{-1.5})$ la ecuación para x_H toma la forma

$$\frac{dx_H}{d\tau} \approx k_{1d} x_{H_2} x_{OH} - k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{3d} x_{H_2} x_O \quad (2-18)$$

mientras que x_O , x_{OH} y x_N han alcanzado ya el estado estacionario:

$$\begin{aligned} 0 &= k_{2d} x_{O_2} x_H - k_{3d} x_{H_2} x_O \\ 0 &= -k_{1d} x_{H_2} x_{OH} + k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{3d} x_{H_2} x_O + 2k_{9d} x_{H_2} x_{O_2} \\ 0 &= k_{10i} x_{N_2} x_O - k_{11i} x_{O_2} x_N \end{aligned} \quad (2-19)$$

Para $\tau \gg \epsilon^{-1.5}$ se obtiene

$$\begin{aligned} x_O &= 0(\epsilon^4 e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) & x_N &= 0(\epsilon^{11} e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) \\ x_H &= 0(\epsilon^{3.5} e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) & x_{NO} &= 0(\epsilon^{10.5} e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) \\ x_{OH} &= 0(\epsilon^{4.5} e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) & x_{N_2O} &= 0(\epsilon^{11.5} e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) \\ x_{H_2O} &= 0(\epsilon^{3.5} e^{c\epsilon^{1.5}\tau}) \end{aligned} \quad (2-20)$$

donde c es del orden de la unidad.

El precedente crecimiento exponencial conduce a una nueva etapa para tiempos tales que $e^{c\epsilon^{1.5}\tau} = 0(\epsilon^{-1})$, es decir, para tiempos ligeramente mayores que $\epsilon^{-1.5}$; más exactamente $\tau = 0(\epsilon^{-1.5} L \epsilon^{-1})$. En estos casos lo más sencillo consiste en

modificar la etapa que se está analizando, incluyendo los términos que se harían dominantes si el crecimiento exponencial continuase. En nuestro caso las ecuaciones modificadas son

$$\frac{dx_H}{d\tau} \approx k_{1d} x_{H_2} x_{OH} - k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{3d} x_{H_2} x_O - 2k_{5d} n_T x_H^2 - k_{7d} n_T x_O x_H - k_{8d} n_T x_H x_{OH}$$

$$\frac{dx_{H_2O}}{d\tau} \approx k_{1d} x_{H_2} x_{OH} + k_{8d} n_T x_H x_{OH}$$

$$\frac{dx_{N_2O}}{d\tau} \approx k_{14i} x_{N_2} x_{OH} - k_{14d} x_H x_{N_2O}$$

$$0 \approx k_{2d} x_{O_2} x_H - k_{3d} x_{H_2} x_O - k_{7d} n_T x_O x_H$$

$$0 \approx -k_{1d} x_{H_2} x_{OH} + k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{3d} x_{H_2} x_O + k_{7d} n_T x_O x_H - k_{8d} n_T x_H x_{OH} + 2k_{9d} x_{H_2} x_O \quad (2-21)$$

Para $\tau \gg \epsilon^{-1.5}$ se tiene

$$x_O = 0(\epsilon) \quad x_H = 0(\epsilon^{0.5}) \quad x_{OH} = 0(\epsilon^{1.5}) \quad x_{H_2O} = 0(\epsilon^2 \tau)$$

$$x_N = 0(\epsilon^8) \quad x_{NO} = 0(\epsilon^9 \tau) \quad x_{N_2O} = 0(\epsilon^9) \quad (2-22)$$

Etapa final

De las ecuaciones anteriores (2-22) se deduce que para $\tau = 0(\epsilon^{-2})$ x_{H_2O} se hace del orden de la unidad y como puede deducirse de las ecuaciones (2-8) x_{H_2} , x_{O_2} y x_{N_2} no pueden perma-

necer constantes e iguales a sus valores iniciales como sucedía en las anteriores etapas.

Las ecuaciones finales a las que se llega son las siguientes

$$\frac{dx_{H_2O}}{d\tau} \approx k_{1d}x_{H_2}x_{OH} - k_{1i}x_{H_2O}x_H + k_{8d}n_Tx_Hx_{OH} + x_{H_2O}k_{2d}x_{O_2}x_H$$

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} \approx k_{11i}x_{O_2}x_N + x_{NO}k_{2d}x_{O_2}x_H + k_{16i}x_{N_2}x_O$$

$$0 \approx k_{2d}x_{O_2}x_H - k_{3d}x_{H_2}x_O - k_{7d}n_Tx_Ox_H$$

$$0 \approx k_{1d}x_{H_2}x_{OH} - k_{1i}x_{H_2O}x_H - k_{2d}x_{O_2}x_H + k_{3d}x_{H_2}x_O - 2k_{5d}n_Tx_{OH}^2 - k_{7d}n_Tx_Ox_H - k_{8d}n_Tx_{OH}x_H$$

$$0 \approx -k_{1d}x_{H_2}x_{OH} + k_{1i}x_{H_2O}x_H + k_{2d}x_{O_2}x_H + k_{3d}x_{H_2}x_O + k_{7d}n_Tx_Ox_H - k_{8d}n_Tx_Hx_{OH}$$

$$0 \approx -k_{9i}x_{O_2}x_N + k_{16i}x_{N_2}x_O$$

$$0 \approx -k_{14d}x_{N_2O}x_H + k_{14i}x_{N_2}x_{OH} \quad (2-23)$$

como puede apreciarse las especies O, H, OH, N y N₂O están en estado estacionario. Se tiene también de las ecuaciones (2-8)

$$\frac{x_{H_2} + x_{H_2O}}{x_{N_2}} = \frac{(x_{H_2})_o}{(x_{N_2})_o} \equiv \alpha, \quad \frac{2x_{O_2} + x_{H_2O}}{2x_{N_2}} = \frac{(x_{O_2})_o}{(x_{N_2})_o} \equiv \beta$$

$$x_{H_2} + x_{O_2} + x_{N_2} + x_{H_2O} = 1 \quad (2-24)$$

El sistema formado por las ecuaciones (2-23) y (2-24) conduce a la siguiente ecuación

$$k_{5d} n_T x_H^2 + k_{8d} n_T x_H^2 \frac{k_{1i} x_{H_2O} + 2k_{2d} x_{O_2}}{k_{1d} x_{H_2} + k_{8d} n_T x_{OH}} - k_{3d} x_{H_2} \frac{k_{2d} x_{O_2} x_H}{k_{3d} x_{H_2} + k_{7d} n_T x_H} = 0 \quad (2-25)$$

cuya única raíz positiva viene dada, con un error menor que en 5%, por

$$x_H = \frac{k_{3d}}{2k_{7d} n_T} x_{H_2} \frac{x_{H_2} + ax_{H_2O} + bx_{O_2}}{x_{H_2}(1+c) + ax_{H_2O} + 2bx_{O_2}}$$

$$x \left[\sqrt{1 + 4b/c x_{O_2} \frac{x_{H_2}(1+c) + ax_{H_2O} + 2bx_{O_2}}{(x_{H_2} + ax_{H_2O} + bx_{O_2})^2}} - 1 \right] \quad (2-26)$$

donde

$$\begin{aligned} a &= \frac{k_{8d} k_{1i}}{k_{1d} k_{5d}} = .52 T^{1.35} e^{-\frac{15577}{RT}} \\ b &= \frac{k_{8d} k_{2d}}{k_{1d} k_{5d}} = .24 T^{1.15} e^{-\frac{11650}{RT}} \\ c &= \frac{k_{3d} k_{8d}}{k_{1d} k_{7d}} = 17 e^{-\frac{7080}{RT}} \end{aligned} \quad (2-27)$$

y

$$\begin{aligned}
 x_{H_2} &= (2 + x_{H_2O}) \frac{\alpha}{2(1 + \alpha + \beta)} - x_{H_2O} \\
 x_{O_2} &= (2 + x_{H_2O}) \frac{\beta}{2(1 + \alpha + \beta)} - \frac{x_{H_2O}}{2} \\
 x_{N_2} &= (2 + x_{H_2O}) \frac{1}{2(1 + \alpha + \beta)}
 \end{aligned} \tag{2-28}$$

Se llega entonces a las ecuaciones

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_{H_2O}}{d\tau} &= (2 + x_{H_2O}) k_{2d} x_{O_2} x_H \\
 \frac{dx_{NO}}{d\tau} &= \left(\frac{2k_{16i} x_{N_2}}{k_{3d} x_{H_2} + k_{7d}^n x_H} + x_{NO} \right) k_{2d} x_{O_2} x_H
 \end{aligned} \tag{2-29}$$

obteniéndose para las demás especies

$$\begin{aligned}
 x_O &= \frac{k_{2d} x_{O_2} x_H}{k_{3d} x_{H_2} + k_{7d}^n x_H}, & x_{OH} &= \frac{k_{1i} x_{H_2O} x_H + 2k_{2d} x_{O_2} x_H}{k_{1d} x_{H_2} + k_{8d}^n x_H} \\
 x_N &= \frac{k_{16i}}{k_{11i}} x_{N_2} \frac{k_{2d} x_H}{k_{3d} x_{H_2} + k_{7d}^n x_H}, \\
 x_{N_2O} &= \frac{k_{14i} x_{N_2}}{k_{14d}} \frac{k_{1i} x_{H_2O} + 2k_{2d} x_{O_2}}{k_{1d} x_{H_2} + k_{8d}^n x_H}
 \end{aligned} \tag{2-30}$$

La primera de las ecuaciones (2-29) conjuntamente con las ecuaciones (2-26), (2-27) y (2-28) proporcionan la expresión para la velocidad de reacción global y la segunda de las ecuaciones (2-29) da entonces la velocidad de formación del NO que es el objetivo

de este estudio. Este conjunto de ecuaciones puede resumirse en las dos expresiones siguientes:

$$\frac{dx_{H_2O}}{dt} = 10^{10} e^{\frac{14.515}{T}} Y_1$$

$$\frac{dx_{NO}}{dt} = \frac{2.1 e^{-\frac{47.859}{T}} Y_2 + x_{NO}}{2 + x_{H_2O}} \cdot \frac{dx_{H_2O}}{dt}$$

donde t viene dada en segundos e Y_1 e Y_2 están representadas en las figuras 2-2 y 2-3. Estas figuras proporcionan los valores de Y_1 e Y_2 en función de la concentración instantánea de H_2O (x_{H_2O}) para diferentes valores de la temperatura y de la concentración relativa del hidrógeno en la mezcla en el instante inicial; para la relación oxígeno-nitrógeno en el instante inicial se ha tomado el valor típico de 0,25.

II) Formación de NO para $T \sim 3000^\circ K$

En este caso se tiene

$$n_T = 0(\epsilon^2) \quad (2-31)$$

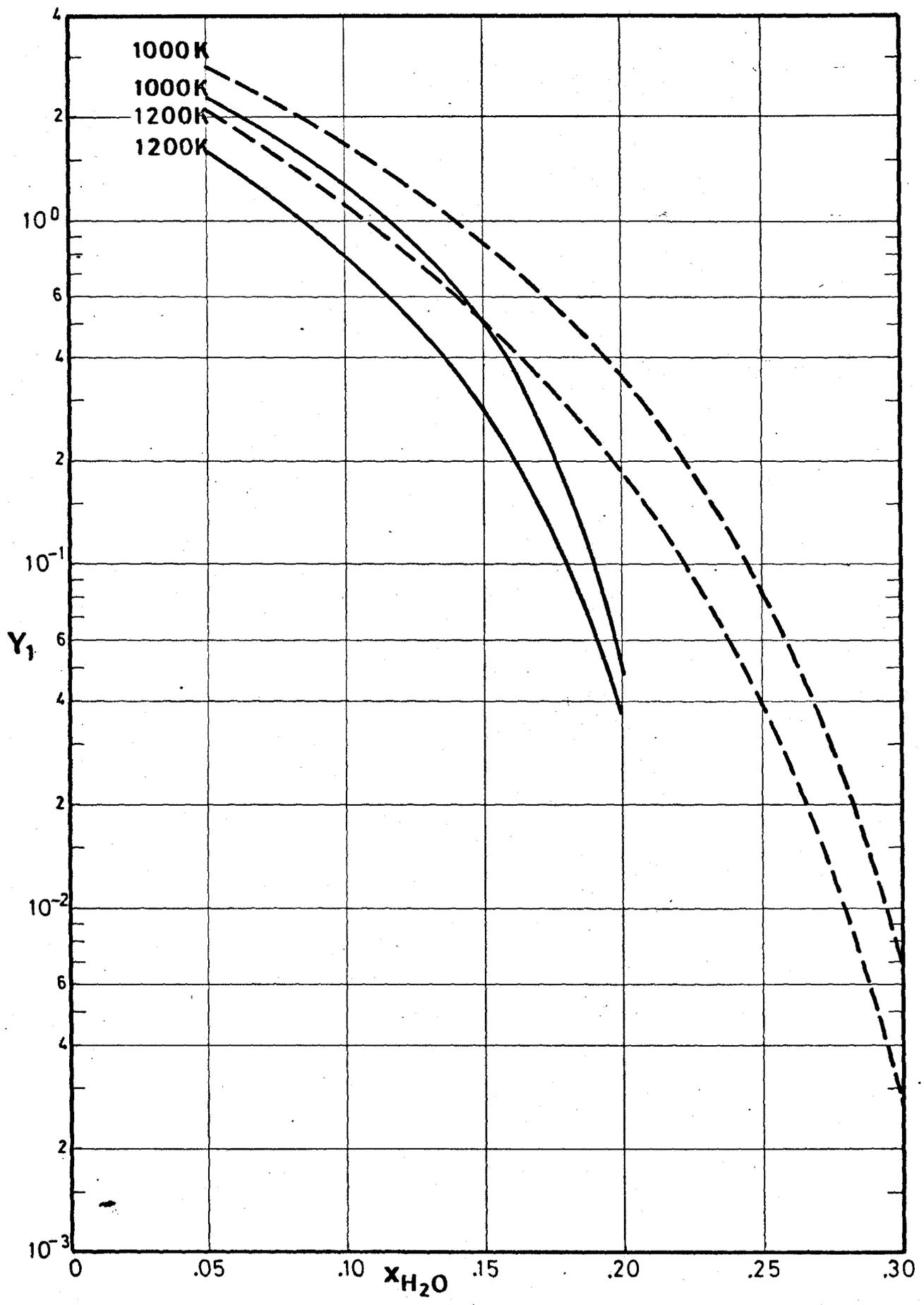


FIG. 2-2

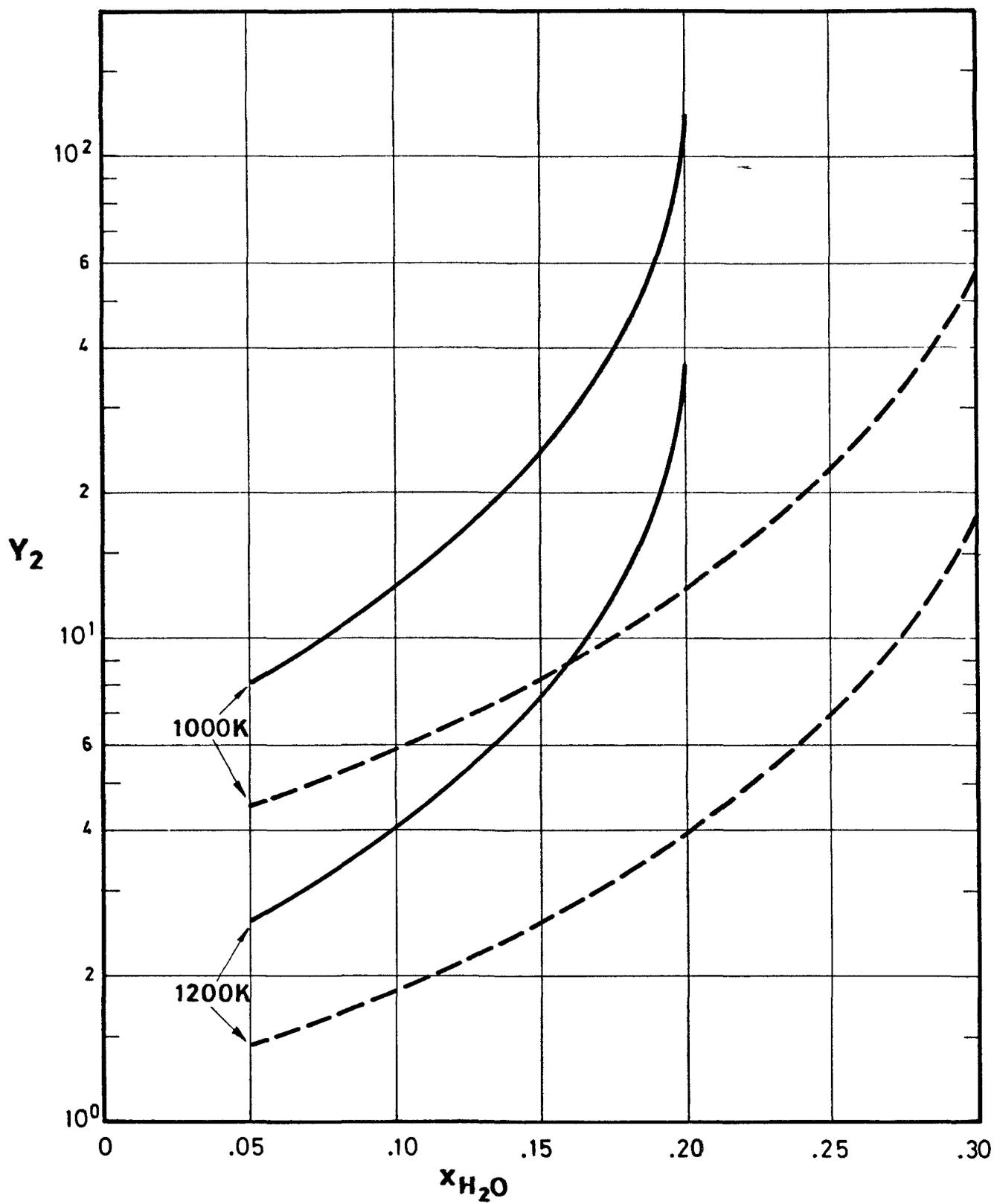


FIG.2-3

y

$k_{1d} = 0(1)$	$k_{1i} = 0(\epsilon^{-0.5})$
$k_{2d} = 0(1)$	$k_{2i} = 0(1)$
$k_{3d} = 0(1)$	$k_{3i} = 0(\epsilon^{0.5})$
$k_{4d} = 0(1)$	$k_{4i} = 0(1)$
$k_{5d} = 0(\epsilon^{-1})$	——
$k_{6d} = 0(\epsilon^{-1})$	——
$k_{7d} = 0(\epsilon^{-1.5})$	$k_{7i} = 0(\epsilon^2)$
$k_{8d} = 0(\epsilon^{-2})$	$k_{8i} = 0(\epsilon^{1.5})$
$k_{9d} = 0(\epsilon^{-0.5})$	$k_{9i} = 0(\epsilon^2)$
$k_{10d} = 0(\epsilon^{1.5})$	$k_{10i} = 0(1)$
$k_{11d} = 0(\epsilon^2)$	$k_{11i} = 0(\epsilon^{0.5})$
$k_{12d} = 0(\epsilon^4)$	$k_{12i} = 0(\epsilon^{-1})$
$k_{13d} = 0(1)$	$k_{13i} = 0(\epsilon^3)$
$k_{14d} = 0(\epsilon^{-0.5})$	$k_{14i} = 0(\epsilon)$
$k_{15d} = 0(\epsilon^{0.5})$	$k_{15i} = 0(\epsilon^{3.5})$
$k_{16d} = 0(\epsilon^{1.5})$	$k_{16i} = 0(\epsilon^{0.5})$
——	$k_{17i} = 0(\epsilon^{-1})$

(2-32)

- - - - -

El análisis conduce a la existencia de dos etapas iniciales tales que en la 2^a de ellas se presenta una exponenciación (igual que 1000°K) la introducción de términos nuevos dominantes conduce a la amortiguación de esta exponenciación en la última etapa (3^a etapa). De estas ecuaciones se deduce que en la etapa de arranque, para τ suficientemente pequeño, se tiene

$$\frac{dx_H}{d\tau} = 2k_{5i} \epsilon^{5/2} x_{H_2}$$

$$\frac{dx_{N_2O}}{d\tau} = k_{16i} \epsilon^{7/2} x_{N_2} x_{O_2}$$

$$\frac{dx_O}{d\tau} = k_{16i} \epsilon^{7/2} x_{N_2} x_{O_2}$$

$$\frac{dx_{OH}}{d\tau} = 2k_{9d} \epsilon^{3/2} x_{O_2} x_{H_2}$$

$$\frac{dx_{H_2O}}{d\tau} = k_{1d} x_{H_2} x_{OH}$$

$$\frac{dx_N}{d\tau} = +k_{10i} \epsilon^2 x_{N_2} x_O$$

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} = k_{10i} \epsilon^2 x_{N_2} x_O$$

(2-33)

de donde

$$\begin{aligned}
 x_H &= O(\epsilon^{2.5}\tau) \\
 x_O &= O(\epsilon^{3.5}\tau) \\
 x_{OH} &= O(\epsilon^{1.5}\tau) \\
 x_{H_2O} &= O(\epsilon^{1.5}\tau^2) \\
 x_N &= O(\epsilon^{5.5}\tau^2) \\
 x_{NO} &= O(\epsilon^{5.5}\tau^2) \\
 x_{N_2O} &= O(\epsilon^{3.5}\tau)
 \end{aligned}
 \tag{2-34}$$

mientras que x_{H_2} , x_{O_2} y x_{N_2} permanecen invariables.

Primera etapa

Para $\tau = O(\epsilon)$ aparece la primera etapa, en la que sólo se modifican las ecuaciones para x_H y x_O

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_H}{d\tau} &= k_{1d}x_{H_2}x_{OH} + 2k_{5i}\epsilon^{2.5}x_{H_2} \\
 \frac{dx_O}{d\tau} &= k_{2d}x_{O_2}x_H + k_{16i}\epsilon^{3.5}x_{N_2}x_{O_2}
 \end{aligned}
 \tag{2-35}$$

Para $\tau \gg \epsilon$ se tiene

$$\begin{aligned}
 x_H &= O(\epsilon^{1.5}\tau^2) & x_N &= O(\epsilon^{3.5}\tau^4) \\
 x_O &= O(\epsilon^{1.5}\tau^3) & x_{NO} &= O(\epsilon^{3.5}\tau^4) \\
 x_{OH} &= O(\epsilon^{1.5}\tau) & x_{N_2O} &= O(\epsilon^{3.5}\tau) \\
 x_{H_2O} &= O(\epsilon^{1.5}\tau^2) & &
 \end{aligned}
 \tag{2-36}$$

Segunda etapa

Para $\tau = 0(1)$ las ecuaciones para x_{H_2O} y x_{N_2O} permanecen invariables, tomando las demás la siguiente forma

$$\frac{dx_H}{d\tau} = k_{1d} x_{H_2} x_{OH} - k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{3d} x_{H_2} x_O$$

$$\frac{dx_O}{d\tau} = k_{2d} x_{O_2} x_H - k_{3d} x_H x_O$$

$$\frac{dx_{OH}}{d\tau} = -k_{1d} x_{H_2} x_{OH} + k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{3d} x_{H_2} x_O + 2k_{9d} \epsilon^{1.5} x_{H_2} x_{O_2}$$

$$\frac{dx_N}{d\tau} = k_{10i} \epsilon^2 x_{N_2} x_O - k_{11i} x_{O_2} x_N$$

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} = k_{10i} \epsilon^2 x_{N_2} x_O + k_{11i} x_{O_2} x_N \quad (2-37)$$

teniéndose entonces que para $\tau \gg 1$ se obtiene un crecimiento exponencial análogo al encontrado en la tercera etapa correspondiente al caso $T \sim 1000^\circ K$. Incluyendo los términos que se harían dominantes si continuase el crecimiento exponencial y después de un largo desarrollo matemático se obtienen las siguientes ecuaciones finales

$$\begin{aligned} \frac{dx_{H_2O}}{d\tau} &= (2 + x_{H_2O}) k_{8d} n_T x_{OH} x_H \\ 0 &= x_{OH} x_O - k_{2d} x_{O_2} x_H + k_{8d} n_T x_H x_{OH} \\ 0 &= k_{1i} x_{H_2O} x_H - k_{1d} x_{H_2} x_{OH} - k_{3d} x_{H_2} x_O \\ 0 &= k_{4i} x_{OH}^2 - k_{3d} x_{H_2} x_O - k_{4d} x_{H_2O} x_O \end{aligned}$$

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} = 2k_{10i}x_{N_2}x_O + x_{NO}k_{8d}^nT^x_{OH}x_H$$

$$0 = k_{10i}x_{N_2}x_O - k_{15d}x_Nx_{OH}$$

$$\frac{dx_{N_2O}}{d\tau} = -k_{12i}x_{N_2}x_O - k_{14d}x_{N_2}x_H + k_{14i}x_{N_2}x_{OH} - k_{16d}x_Ox_{N_2} + x_{N_2}k_{8d}^nT^x_{OH}x_H$$

$$\frac{2x_{H_2} + 2x_{H_2O} + x_{OH}}{2x_{N_2}} = \frac{(x_{H_2})_o}{(x_{N_2})_o} \equiv \alpha$$

$$\frac{2x_{O_2} + 2x_{H_2O} + x_{OH}}{2x_{N_2}} = \frac{(x_{O_2})_o}{(x_{N_2})_o} \equiv \beta$$

$$x_{H_2} + x_{O_2} + x_{N_2} + x_{H_2O} + x_{OH} = 1 \quad (2-38)$$

Las ecuaciones para x_{NO} y x_{H_2O} de este sistema juntamente con las ecuaciones siguientes

$$A = \frac{\beta}{1 + \alpha + \beta}$$

$$B = \frac{1 + \alpha}{2(1 + \alpha + \beta)}$$

$$C = \frac{\alpha}{1 + \alpha + \beta}$$

$$D = \frac{2 + \alpha + 2\beta}{2(1 + \alpha + \beta)}$$

$$x_{OH} = \left[\frac{k_{1d}k_{2d}k_{3d}}{k_{1i}k_{4i}} \frac{(A - Bx_{H_2O})(C - Dx_{H_2O})}{x_{H_2O}} \left(C - Dx_{H_2O} + \frac{k_{4d}}{k_{3d}} x_{H_2O} \right) \right]^{1/2}$$

$$x_{O_2} = A - Bx_{H_2O} - x_{OH}/2$$

$$x_{H_2} = C - Dx_{H_2O} - x_{OH}/2$$

$$x_H = \frac{k_{4i} x_{OH}^3}{(k_{2d} x_{O_2})^2} \frac{k_{2d} x_{O_2} + k_{8d} n_T x_{OH}}{k_{3d} x_{H_2} + k_{4d} x_{H_2O}}$$

$$x_{N_2} = 1 - x_{O_2} - x_{H_2} - x_{H_2O} - x_{OH}$$

$$x_O = \frac{k_{4i} x_{OH}^2}{k_{3d} x_{H_2} + k_{4d} x_{H_2O}}$$

proporcionan las velocidades de reacción y de formación del NO globales.

III) Formación de NO para $T \sim 2000^\circ K$.

Para este margen de temperatura se ha hecho un análisis matemático semejante, encontrándose que existen tres etapas después de la de arranque o etapa "cero"; en la tercera y última $\tau = 0(1)$ y las ecuaciones que se obtienen son

$$\frac{dx_{H_2O}}{d\tau} = k_{1d} x_{H_2} x_{OH} - k_{1i} x_{H_2O} x_H + k_{4i} x_{OH}^2 + k_{8d} n_T x_H x_{OH} + x_{H_2O} k_{8d} n_T x_{OH}$$

$$\frac{dx_O}{d\tau} = k_{2d} x_{O_2} x_H - x_O x_{OH} - k_{3d} x_{H_2} x_O + k_{4i} x_{OH}^2 + x_O k_{8d} n_T x_H x_{OH}$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_H}{d\tau} = & k_{1d} x_{H_2} x_{OH} - k_{1i} x_{H_2O} x_H - k_{2d} x_{O_2} x_H + x_{OH} x_O + k_{3d} x_{H_2} x_O - \\ & - k_{8d} n_T x_H x_{OH} + x_H k_{8d} n_T x_H x_{OH} \end{aligned}$$

$$\frac{dx_{OH}}{d\tau} = -k_{1d}x_{H_2}x_{OH} + k_{1i}x_{H_2O}x_H + k_{2d}x_{O_2}x_H - x_{OH}x_O + k_{3d}x_{H_2}x_O$$

$$- 2k_{4i}x_{OH}^2 - k_{8d}n_T x_H x_{OH} + x_{OH}k_{8d}n_T x_H x_{OH}$$

$$\frac{dx_{NO}}{d\tau} = 2k_{10i}x_{N_2}x_O + x_{NO}k_{8d}n_T x_{OH}$$

$$0 = k_{10i}x_{N_2}x_O - k_{15d}x_N x_{OH}$$

$$0 = -k_{14d}x_{N_2O}x_H + k_{14i}x_{N_2}x_{OH}$$

$$\frac{2x_{H_2O} + 2x_{H_2} + x_H + x_{OH}}{2x_{N_2}} = \frac{(x_{H_2})_o}{(x_{N_2})_o}$$

$$\frac{2x_{O_2} + x_{H_2O} + x_O + x_{OH}}{2x_{N_2}} = \frac{(x_{O_2})_o}{(x_{N_2})_o}$$

$$x_{O_2} + x_{H_2} + x_{N_2} + x_{H_2O} + x_H + x_O + x_{OH} = 1 \quad (2-39)$$

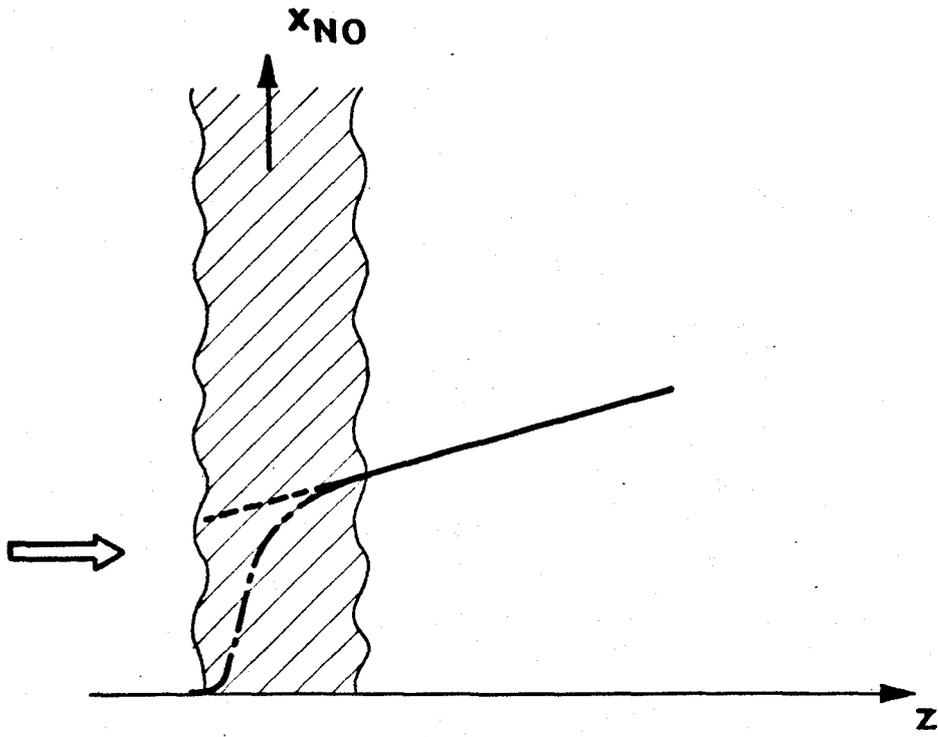
Como puede observarse, de este sistema, las especies O, H y OH no se encuentran en estado estacionario en la etapa final, contrariamente a lo que sucedía en el caso de $T \sim 1000^\circ K$ por lo que para $T \sim 2000^\circ K$ no existe una velocidad de reacción global y velocidad de formación del NO.

2.3 Discusión

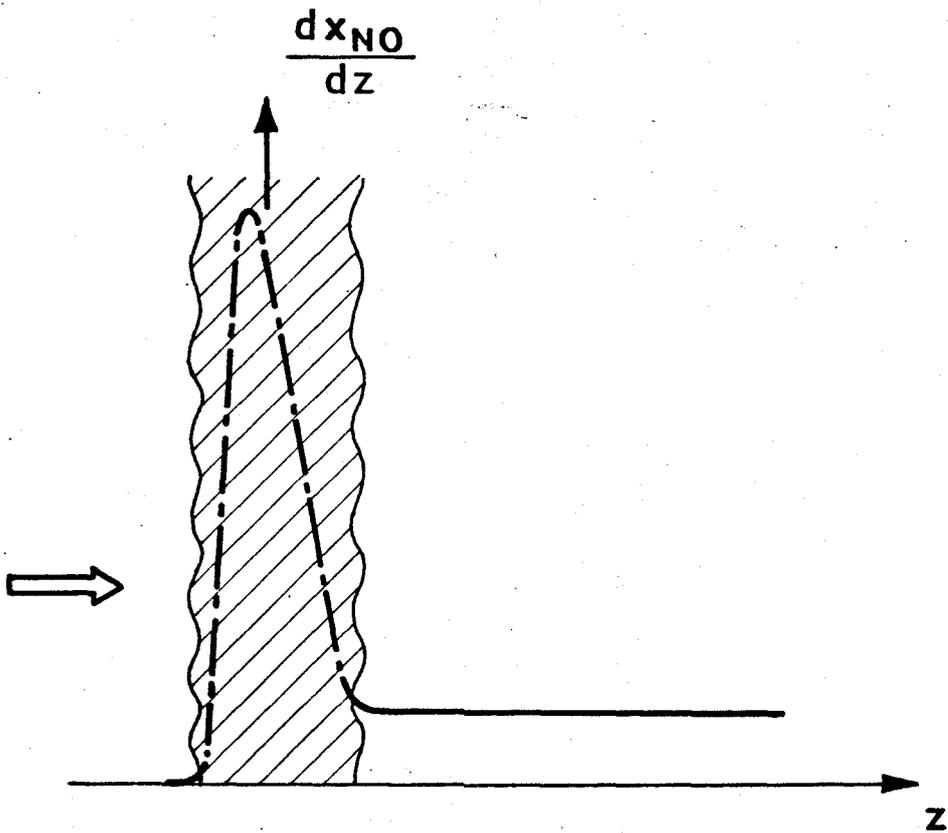
a) El problema de la combustión de un hidrocarburo simple como metano, etano, etc. se podría estudiar mediante un análisis análogo al llevado a cabo en el apartado anterior ya que se conocen los esquemas cinéticos apropiados^{2-9,2-57} para la descomposición de dichos hidrocarburos.

La velocidad de formación del NO depende tanto de la cinética de combustión del hidrocarburo como de la cinética de disociación del N_2 . La detección del llamado "NO súbito" ha puesto en duda la validez del clásico esquema de Zeldovich para dicha disociación en la reacción hidrocarburo-aire. Sarofim y Pohl²⁻⁴⁹ y Bowman²⁻⁹ concluyeron que el mecanismo de Zeldovich es consistente con la existencia del "NO súbito", mientras que Fenimore²⁻²³ e Iverach y otros²⁻³⁰ sostienen que ese mecanismo es incapaz de explicar tal existencia.

Para aclarar el concepto de "NO súbito", consideremos el caso usual de una llama premezclada estabilizada Fig.2-4. En dicha figura la mezcla fluye según el eje z hacia la llama (zona rayada) que se supone muy delgada con relación a la longitud característica del problema, que pudiera ser, por ejemplo, la longitud de la cámara de reacción; Fenimore comprobó que la concentración de NO a la derecha de la llama, zona de medición, crecía con z como indica la Fig.2-4(a). Extrapolando la curva



(a)



(b)

hasta el comienzo de la llama se obtendría un valor no nulo de x_{NO} aguas arriba de la llama denominado "NO súbito", ya que en el problema equivalente de la evolución temporal de una mezcla espacialmente uniforme con condiciones iniciales dadas aparecería súbitamente un valor no nulo de x_{NO} en el instante inicial (el tiempo y la variable z de la figura serían equivalentes). En esta Fig.2-4(a) está representada también la evolución de la concentración de NO real en el interior de la llama.

En la Fig.2-4(b) que representa la velocidad de formación del NO, deducida de la Fig.2-4(a), puede apreciarse que dicha velocidad de formación debe presentar un máximo muy acentuado. La explicación de este máximo es precisamente el objeto de esta polémica. La tesis de Bowman es que dicho máximo puede ser explicado por la existencia en la llama de una concentración de oxígeno atómico muy superior a la correspondiente a la temperatura local de equilibrio, existencia que se ha comprobado experimentalmente.

Por el contrario, la tesis de Fenimore es que se necesita apelar a un mecanismo de rotura de las moléculas de nitrógeno más efectivo que el de Zeldovich. Este mecanismo se debería a la presencia de radicales muy activos conteniendo átomos de C, los cuales evidentemente no existen en la reacción hidrógeno-aire.

Así, mientras que en el caso hidrógeno-aire la validez del esquema de Zeldovich no ofrece duda (como confirma el trabajo presente) la determinación de la formación de NO en el caso hidrocarburo-aire exige el conocimiento de las velocidades de reacción de N_2 con una serie de radicales de carbono. Desgraciadamente el conocimiento de la cinética de tales reacciones es incompleta en el momento presente. No obstante, se espera obtener en un futuro próximo y proseguir la investigación.

b) Para analizar la situación que se presenta en una cámara de combustión real es preciso resolver las ecuaciones fluidomecánicas, simultáneamente con las ecuaciones de la cinética química apropiadas a las condiciones del problema. Con las simplificaciones usuales y realísticas de presión uniforme en la cámara, y condiciones unidimensionales y estacionarias, el problema fluidodinámico se reduce al estudio de la evolución, a lo largo de la cámara, de la temperatura de la mezcla y de las concentraciones de las diversas especies. Para hallar dicha evolución es necesario conocer las velocidades de formación de dichas especies; en nuestro caso, cuando existe una velocidad de reacción global, es decir, una descripción compacta de la cinética química, basta considerar la velocidad de formación del H_2O y del NO. Asimismo, es necesario conocer el calor de reacción el cual se deduce de la estequiometría global.

El presente trabajo, en el cual obviamente la variable tiempo hace el papel de la posición a lo largo de la cámara, proporciona precisamente las velocidades y calor de formación globales citados, en función de la presión en la cámara y de la temperatura y concentraciones de H_2O y NO locales, así como de las condiciones iniciales, o de entrada, de la mezcla.

Es evidente que la aplicación, a condiciones no isotérmicas, de los presentes resultados sobre velocidades de formación globales obtenidos para procesos isoterms, requiere para su validez que el tiempo químico (tiempo para que las especies intermedias alcancen el estado estacionario) sea pequeño con el tiempo de residencia, definido con la menor longitud característica para la variación de la temperatura.

2.4 Referencias

- 2-1 ALPERSTEIN, M. : "Exhaust Emissions Related to Engine
y Combustion Reactions"
BRADOW, R.L. Fuels and Lubricants Meeting, SAE
paper 660781, 1966.
- 2-2 APPLETON, J.P. : "The effects of imperfect fuel-air
y mixing in a burner on NO formation
HEYWOOD, J.B. from nitrogen in the air and the fuel"
XIV Symposium (International) on
Combustion, 1972.
- 2-3 BARTOK, W. : "Systems Study of Nitrogen Oxide Con-
y trol Methods for Stationary Sources"
CRAWFORD, A.R. Esso Rpt. No GR-1, No 69, 1969.
- 2-4 BASTRESS, E.K. : "Nature and Control of Aircraft Engine
y Exhaust Emissions"
FLETCHER, R.S. NREC Rep. No 1134-1, 1968.
- 2-5 BAULCH, D.L. : "Critical Evaluation of Rate Data for
y Homogeneous Gas Phase Reactions of In-
otros terest in High-temperature Systems"
University of Leeds, 1969.
- 2-6 BEER, J.M. : "The Effects of Residence Time Distri-
y bution on the Performance and Effi-
LEE, J.B. ciency of Combustion"
Tenth Symposium (International) on
Combustion, 1965.
- 2-7 BENSON, S.W. : "Mechanism of Atom Recombination by Con-
y secutive Vibrational Deactivations"
FUENS, T. J. of Chemical Physics, Vol. 36, 1962.
- 2-8 BOWMAN, C.T. : "Investigation of NO Formation in Com-
bustion Processes: The H₂-O₂-N₂ Re-
action"
Combustion Science and Technology,
Vol.3, No 1, 1971.
-

- 2-9 BOWMAN, C.T. : "Kinetics of NO Formation in Combustion Processes"
XIV Symposium (International) on Combustion, 1972.
- 2-10 BLUMBERG, P. : "Predictions of NO Formation in Spark
y Ignited Engines and Analysis of Meth-
KUMMER, J.T. ods of Control"
Combustion Science and Technology,
Vol.4, No 2, 1971.
- 2-11 BREEN, B.P. : "Combustion Control for Elimination of
y NO Emissions from Fossil-fuel Power
otros Plants"
XIII Symposium (International) on Com-
bustion, 1970.
- 2-12 BRISTOL, C.W. : "Gas Turbine Engine Emission Character-
istics and Future Outlook"
Proceedings of the SAE/DOT Conference
on Aircraft and Environment, 1971.
- 2-13 CLARK, J.S. : "The Relation of Specif Heat Release to
Pressure Drop in Aero-gas-turbine Com-
bustion Chambers"
Proceedings of the 1955 IME-ASME Confe-
rence on Combustion, 1955.
- 2-14 CAMAC, M. : "Formation of NO Shock Heated Air"
y Eleventh Symposium (International) on
FEINBERG, R.M. Combustion, 1967.
- 2-15 CAMPBELL, I.M. : "Reactivity of Hydrogen to Atomic Ni-
y trogen and Atomic Oxygen"
THRUSH, B.A. Trans, Faraday Soc. Vol.64, part.5,
1968.
- 2-16 CARETTO, L.S. : "The Role of Kinetics in Engine Emis-
y sions of Nitric Oxide"
otros Combustion Science and Technology,
Vol.2, No 3, 1971.
- 2-17 CARETTO, L.S. : "The Formation of NO in Combustion Processes"
y otros The Combustion Institute, 1968.

- 2-18 CARETTO, L.S. : "Modeling Pollutant Formation in Combustion Processes"
XIV Symposium (International) on Combustion, 1972.
- 2-19 CARNICOM, M.L. : "Reaction Rates for High Temperature Air"
Sandia Labs 1966.
- 2-20 EDELMAN, R.B. : "A Mathematical Model for Jet Engine
y Combustor Pollutant Emissions"
ECONOMOS, C. AIAA paper 71-714, 1971.
- 2-21 EDELMAN, R.B. : "A Quasi-global Chemical Kinetic Model
y for Definite Rate Combustion of Hydrocarbon Fuels with Application to Turbulent Burning and Mixing in Hypersonic Engines and Nozzles"
FORTUNE, O.F. AIAA paper 69-86, 1969.
- 2-22 ENGLEMAN, V.S. : "Experimental and Theoretical Studies
y of NO_x Formation in a Jet-stirred
otros Combustor"
XIV Symposium (International) on Combustion, 1972.
- 2-23 FENIMORE, C.P. : "Formation of NO in Premixed Hydrocarbon Flames"
13th Symposium (International) on Combustion, 1970.
- 2-24 FLETCHER, R.S. : "A Model for Nitric Oxide Emissions
y from Aircraft Gas Turbine Engines"
HEYWOOD, J.B. AIAA paper 71-123, 1971.
- 2-25 HAMMOND, D.C. : "Analytical Calculations for the Performance and Pollutant Emissions of
y Gas Turbine Combustors"
MELLER, A.M. AIAA paper 71-711, 1971.
- 2-26 HAZEN, D.F. : "The Effects of Engine Operating and Design Variables on Exhaust Emissions"
y HOLIDAY, G.N. SAE paper 486 C, 1962.

- 2-27 HEYWOOD, J.B. : "Jet Aircraft Air Pollutant Production
y and Dispersion"
otros AIAA paper 70-115, 1970.
- 2-28 HEYWOOD, J.B. : "Predictions of Nitric Oxide Concentra
y tions a Spark Ignition Engine Compared
otros with Exhaust Measurements"
SAE paper 71-0011, 1971.
- 2-29 HULS, T.A. : "Influence of Engine Variables on Ex-
haust Oxides of Nitrogen Concentra-
tions form a Multicylinder Engine"
SAE paper 67-0482, 1967.
- 2-30 IVERACH, D. : "Formation of NO in Fuel-lean and Fuel-
y rich Flames"
otros XIV Symposium (International) on Com-
bustion, 1972.
- 2-31 KAUFMAN, F. : "Elementary Gas Reactions"
Annual Review of Physical Chemistry
Vol. 20, 1969.
- 2-32 KIND, C. : "Calculating the Flow in the Combus-
y tion Chamber of Gas Turbines"
YOUSSEF, T. Brown Boveri Review, Vol.51, 1964.
- 2-33 LAVOIE, G.A. : "Experimental and Theoretical Study of
y Nitric Oxide Formation in Internal
otros Combustion Engines"
Combustion Science and Technology,
Vol.1, No.4, 1970.
- 2-34 LAVOIE, G.A. : "Spectroscopic Measurements of Nitric
Oxide in Spark Ignition Engines"
Combustion and Flame, Vol 15, 1970.
- 2-35 LAFEVRE, A.H. : "Design Considerations in Advanced Gas
Turbines Combustion Chambers"
International Propulsion Symposium
Cranfield, 1967.
-

- 2-36 LIÑAN, A. : "Análisis de la reacción hidrógeno oxígeno mediante métodos de perturbaciones singulares"
y URRUTIA, J.L. Ingenieria Aeronáutica y Astronáutica, No. 108, 1969.
- 2-37 LIVESEY, J.B. : "The Formation of Oxides of Nitrogen
y in some Oxy-Propano Flames"
otros Combustion Science and Technology, Vol.14, No.1, 1971.
- 2-38 LOZANO, E.R. : "Air Pollution Emissions from Jet
y Engines"
otros J. of Air Pollution, Vol.18, 1968.
- 2-39 MARTENEY, P.J. : "Analytical Study of the Kinetics of
Formation of Nitrogen Oxide in Hydrocarbon Air Combustion"
Combustion Science and Technology, Vol.1, No 6, 1970.
- 2-40 MELLOR, A.M. : "An Investigation of Gas Turbines Com-
bustors with High Inlet Air Tempera-
tures"
Jet Propulsion Center, Purdue Univer-
sity, Rpt TM-70-2, 1970.
- 2-41 NEWHALL, H.K. : "Kinetics of Engine Generated Nitrogen
Oxides and Carbon Monoxide"
Twelve Symposium (International) on
Combustion, 1968.
- 2-42 NEWHALL, H.K. : "Kinetics of NO Formation in High-
y pressure Flames"
SHAHED, S.M. XIII Symposium (International) on Com-
bustion, 1970.
- 2-43 NEWHALL, H.K. : "Direct Spectroscopic Determination of
y Nitric Oxide in Reciprocating Engine
STARKMAN, E.S. Cycles"
SAE Automotive Engineering Congress,
1967.

- 2-44 OPSAHL, A.W. : "The Effect of Oscillatory Combustion
y on the Formation of Atmospheric Pol-
SEAGRAVE, R.C. lutans"
Combustion and Flames, Vol 14, 1970.
- 2-45 PRUD'HOMME, R. : "Tableau des Vitesses Spécifiques de
y Reactions Chimiques Utilisables en
LEQUOY, C. Aerothermochimie"
ONERA, NT 147, 1969.
- 2-46 ROBERTS, R. : "An Analytical Model for Nitric Oxide
y Formation in a Gas Turbine Combustion"
otros AIAA J. Vol. 10, No 6, 1972.
- 2-47 ROSENTHAL, J. : "Exploratory Methods for the Determina-
tion of Gas Flow and Temperature Pat-
ters in Gas Turbine Combustors"
Dept. of Supply, Australia, 1959.
- 2-48 SANMARTIN, J.R. : "Overall Reaction Rate and Stoichiome-
try for Thermal Decomposition of
Hydrazine"
(Aparecerá en Proceedings of Interna-
tional Conference on "Properties of
Hydrazine and its Potential Applica-
tions as an Energy Source" Poitiers,
Octubre 1974.
- 2-49 SAROFIM, A.F. : "Kinetics of NO Formation in a Premixed
y Laminar Methane Flame"
POHL, J. XIV Symposium (International) on Com-
bustion, 1972.
- 2-50 SAWYER, R.F. : "Air Pollution Characteristics of Gas
y Turbine Engines"
otros Trans. ASME J. of Eng. for Power, 1969.
- 2-51 SAWYER, R.F. : "Gas Turbine Exhaust Emissions"
y STARKMAN, E.S. SAE paper 68-0462, 1968.
- 2-52 SAWYER, R.F. : "Fundamental Processes Controlling the
Air Pollution Emissions from Turbojet
Engines" AIAA paper, 69-1040, 1969.

- 2-53 SCHOFIELD, K. : "An Evaluation of Kinetic Rate Data
for Reactions of Neutrals of Atmos-
pheric Interest"
Planetary Space Science Vol 15, 1967.
- 2-54 SMITH, D.S. : "Oxides of Nitrogen from Gas Turbines"
y J. of Air Pollution Control, Vol.18,
otros 1968.
- 2-55 STARKMAN, E.S. : "The Role of Chemistry in Gas Turbine
y Emissions"
otros ASME paper 70-GT-81, 1970.
- 2-56 STALL, D.R. : "JANAF Thermochemical Tables"
y PROPHEET, H. N.B.S, 1971.
- 2-57 TAMAGNO, J. : "Supersonic combustion in premixed
y Hydrocarbon-Air flow"
otros AFOSR S.R. 66-0872.
- 2-58 URRUTIA, J.L. : "The Homogeneous Gas Phase Decomposi-
tion of Hydrazine"
Progress Rep. ESRO, Contract Núm.
1121/70 AA.
- 2-59 WESTEMBERG, A.A. : "Kinetics of NO and CO in Lean Pre-
mixed Hydrocarbon-Air Flames"
Combustion Science and Technology,
Vol.4, No 2, 1971.
- 2-60 WILLIAMS, F.A. : "Combustion Theory"
Addison Wesley, 1965.
- 2-61 WIMMER, D.B. : "Nitrogen Oxides and Engine Combustion"
y SAE Summer Meeting, SAE paper 380 E,
Mc.REYNOLDS, L.A. 1961.
- - - - -

CAPITULO 3°

TEMPERATURAS DE LLAMAS Y FORMACION DE OXIDOS
DE NITROGENO

3. TEMPERATURAS DE LLAMAS Y FORMACION DE OXIDOS DE NITROGENO

3.1 Introducción

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior la formación de óxidos de nitrógeno depende esencialmente de la temperatura de la llama, y por ello la mayoría de los métodos de reducción de estos óxidos de nitrógeno se basan en la reducción de la temperatura de la llama.

En los procesos de combustión las llamas son de tipo de difusión o bien de tipo premezclado.

Una llama de difusión es aquella en la que las especies que reaccionan, oxidante y combustible, llegan al frente de reacción o llama por sus dos lados mediante un proceso de difusión, como, por ejemplo, en el caso de gotas de combustible ardiendo en aire (Fig.3-1) o la llama de un mechero de gas.

En una llama premezclada, como su nombre indica, ambas especies están ya mezcladas antes que se produzca en ella la reacción de combustión. Una llama que se propaga a través de una mezcla de vapores de combustible y aire (Fig.3-2) es un típico ejemplo de esta clase de procesos (véanse, por ejemplo, ref.3-1)

En una llama de difusión la temperatura de la llama viene controlada por la relación local aire/combustible con la

LLAMA DE DIFUSION

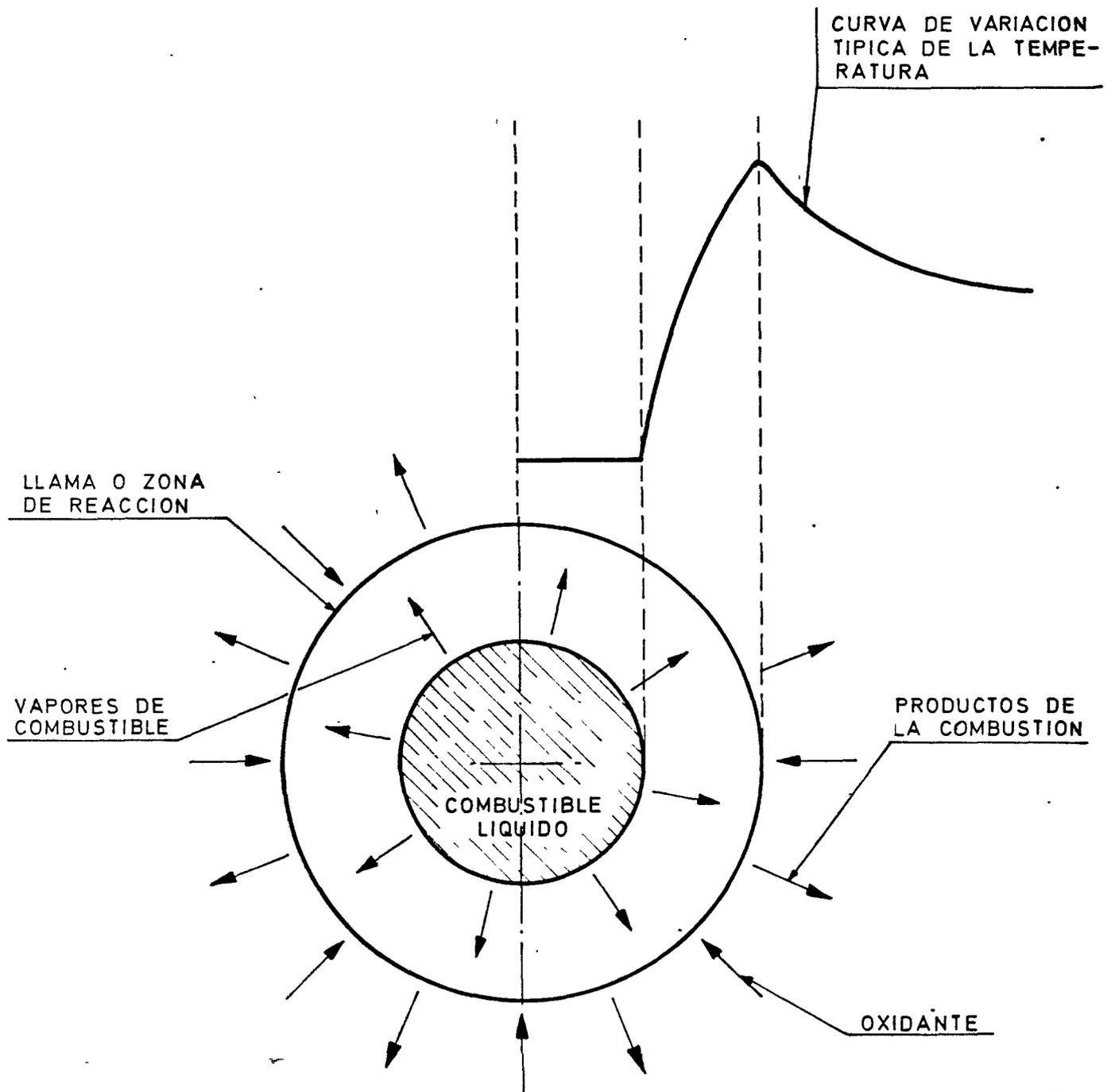


FIG.3-1

LLAMA PREMEZCLADA

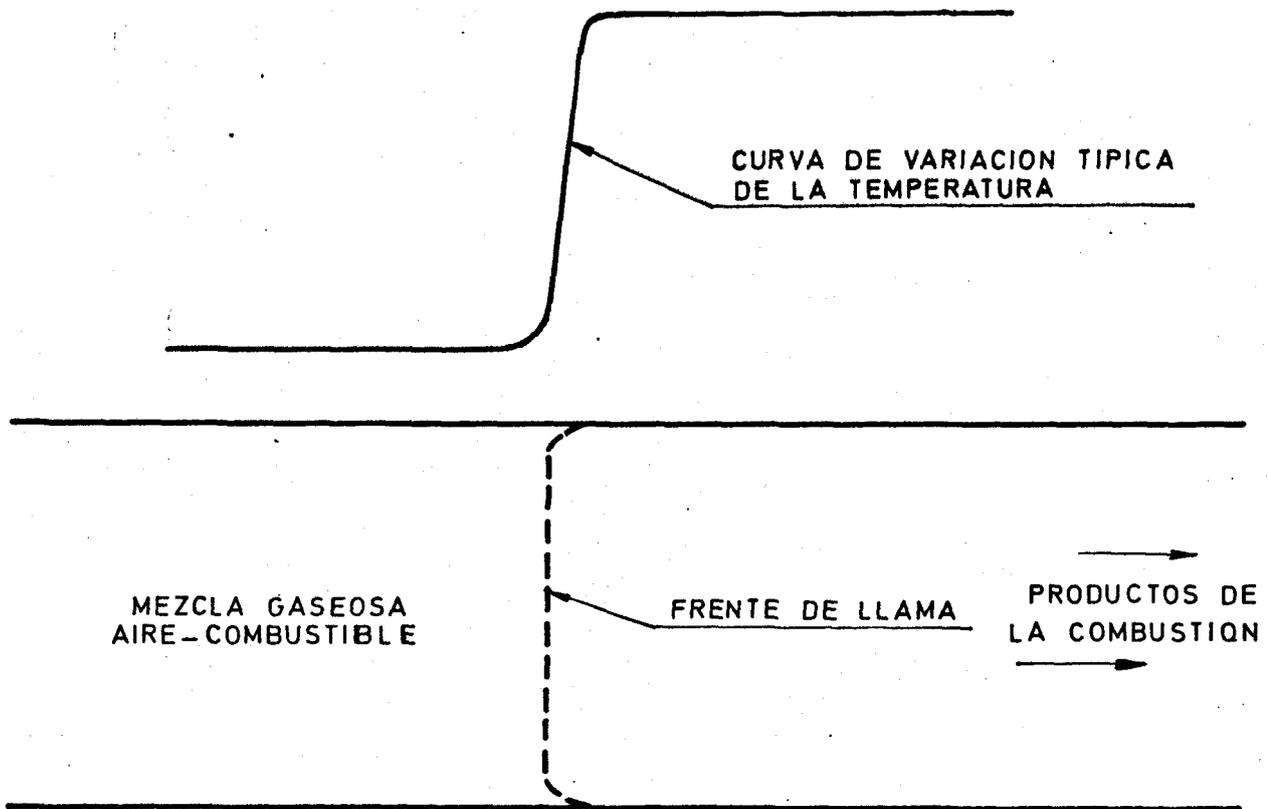


FIG. 3-2

que las dos especies alcanzan la zona de reacción, que es igual o próxima a la estequiométrica; independientemente de la relación global aire/combustible que pueda existir en la cámara de combustión. Por ello se originan picos de temperatura como la mostrada en la Fig.3-1, (ref.3-2).

Por el contrario, en una llama premezclada la temperatura máxima (Fig.3-2) depende de la relación aire/combustible con que se hayan mezclado las dos especies, que puede ser igual a la relación global en la cámara de combustión.

Por ello, cuando existen llamas de difusión en las cámaras de combustión, como puede acontecer al ocurrir la combustión en forma de gotas, o bien mediante el mezclado y combustión simultáneas de dos corrientes gaseosas (oxidante y combustible); puede no resultar eficaz tratar de reducir la temperatura de la llama aumentando la relación global aire/combustible, ya que localmente podrían subsistir zonas de combustión estequiométrica en los frentes de las llamas de difusión.

Por el contrario, en las llamas premezcladas puede controlarse fácilmente la temperatura máxima de la llama actuando sobre la relación global aire/combustible.

La fuerte turbulencia que existe en la mayoría de los procesos tecnológicos de combustión modifica substancialmente la temperatura de las llamas. Los picos de temperatura máxima

desaparecen, ya que son ocasionados por la difusión de tipo molecular y sobre ésta prevalece la difusión turbulenta, lo que resulta en un aplanamiento de los perfiles de las temperaturas.

Por ello, aún en procesos típicos de combustión con llamas de difusión, como en la combustión de chorros de gotas, puede ser posible controlar la formación de óxidos de nitrógeno actuando sobre la relación global aire/combustible. Asimismo, la turbulencia influye decisivamente en las posibles reducciones de óxidos de nitrógeno que en teoría pueden conseguirse al eliminar la combustión de gotas empleando combustibles gaseosos o pre-vaporizando un combustible líquido, o bien premezclando combustibles gaseosos antes del proceso de combustión.

La existencia de la turbulencia, hace imprescindible la necesidad de la experimentación para la resolución de estos problemas, habiéndose dedicado a estos estudios experimentales gran parte del capítulo 4.

Otro procedimiento para reducir las temperaturas de las llamas es el de diluir el aire con un gas inerte, que pueden ser los mismos gases de combustión, lo que a su vez puede conseguirse mediante un recirculado de los gases quemados o bien mediante una combustión escalonada, siendo posible en ambos casos actuar sobre llamas premezcladas o de difusión.

Al estudio teórico de todos estos procesos se ha dedica

do este capítulo. En la primera parte se estudiarán las temperaturas de las llamas, tanto en premezcladas como de difusión.

En la segunda parte se estudiará la formación de óxidos de nitrógeno (NO) en llamas laminares de difusión, utilizando un modelo (cineto-químico) simplificado. Finalmente, en la tercera y última parte se aplicarán estos resultados a la formación de óxidos de NO en combustión de chorros de gotas y en pequeñas esferas de gas.

3.2 Notación del Capítulo

a . . .	Radio de la gota.
A . . .	Constante definida en fórmula (3-23)
B . . .	" " " (3-24)
C . . .	" " " (3-25)
c_p . . .	Calor específico.
D . . .	Coefficiente de difusión.
E . . .	Constante definida en fórmula (3-26).
f . . .	{ Función de la temperatura. Ecuación velocidad de reacción (3-12)
K_1, K_2 . . .	Velocidades de reacción.
K . . .	Coefficiente de conductividad térmica.
λ_0 . . .	Tamaño del núcleo viscoso.
$\dot{m} = 4\pi r^2 \rho v$	-Flujo másico.
m . . .	Fórmula (3-45), autovalor.

m''_{NO}	. . .	Masa producida de NO por unidad de tiempo y unidad de superficie de llama.
m''_{O_2}	. . .	Masa consumida de O_2 por unidad de tiempo y de superficie de llama.
m''_C	. . .	Igual que la anterior para el combustible.
M	. . .	Peso molecular.
μ	. . .	Viscosidad
p	. . .	Presión.
p_o	. . .	Fórmula (3-41), autovalor.
Π_{NO}	. . .	Producción total de NO de una gota o bolsa de gas.
q, q_r	. . .	Calor de reacción por unidad de masa de especie 1 o de combustible.
q''_{O_2}	. . .	Calor que fluye desde la llama hacia la zona del oxidante.
r	. . .	Distancia al origen.
$r^* = \frac{\dot{m}}{4\pi\rho D}$	-	Cantidad de dimensiones de distancia.
Re	. . .	Número de Reynolds.
R_u	. . .	Constante universal de los gases.
t_l	. . .	Tiempo de vida.
T	. . .	Temperatura.
t	. . .	Tiempo.
T_a	. . .	Tiempo de activación.
U	. . .	Velocidad turbulenta.
U_r	. . .	Velocidad relativa de la bolsa de gas.
U_{λ_o}	. . .	Velocidad característica del núcleo viscoso.

V	. . .	Velocidad radial.
w	. . .	Velocidad de reacción.
w _{NO}	. . .	Masa producida de NO por unidad de volumen
X	. . .	Combinación lineal de concentraciones y temperaturas fórmulas (3-14) a (3-16).
y	. . .	Distancia a la llama del lado del oxidante.
Y	. . .	Fracción másica.
γ	. . .	Ver ecuación (3-39)
v	. . .	Relación estequiométrica.
ρ	. . .	Densidad
ζ	. . .	Ver ecuación (3-40)

Subíndices

- 1 - especie en el ∞ (puede que inyectada)
- 2 - especie inyectada u oxidante
- 3 - gases inertes
- s - superficie gota o esfera
- o - condiciones en la inyección o iniciales
- p - llama premezclada
- d - llama de difusión
- c - combustible.

3.3 Temperaturas de llamas premezcladas y de difusión. Modelo del proceso.

- 3.3.1 *Se estudiarán estos procesos considerando simetría esférica con objeto de simplificarlos.*

El modelo que se considerará es el siguiente (Fig.3-3): Se supone se inyectan a través de un quemador poroso un oxidante (1) con una fracción másica $Y_{2,0}$; un combustible $Y_{1,0}$ y un gas neutro $Y_{3,0}$. Rodeando el quemador esférico existe oxidante Y_2 con una concentración en el infinito $Y_{2,\infty}$ y gases quemados, con una concentración en el infinito $Y_{3,\infty}$. Como para simplificar se tomarán iguales calores específicos para todas las especies químicas, y números de Lewis-Semenov iguales a la unidad, no se hará diferencia entre los gases quemados y el gas neutro inyectado en el quemador poroso que puede ser nitrógeno o gases quemados.

Otras suposiciones son las siguientes:

No se tendrán en cuenta efectos de convección, por lo que el proceso se admitirá que tiene simetría esférica y se supondrá condiciones laminares.

La cinética química del proceso se tendrá en cuenta mediante una reacción global de segundo orden para la llama premezclada y admitiendo una velocidad de reacción infinita para la llama de difusión, suposiciones ambas normales en la práctica.

Finalmente, se indica que se considerará la presión constante en el proceso, lo que se justifica también en esta clase de llamas.

MODELO DE UN QUEMADOR POROSO CON INYECCION DE OXIDANTE (Y_2), COMBUSTIBLE (Y_1) Y GAS INERTE (Y_3). LA REACCION ACONTECE EN UNA LLAMA PREMEZCLADA SEGUIDA DE OTRA DE DIFUSION.

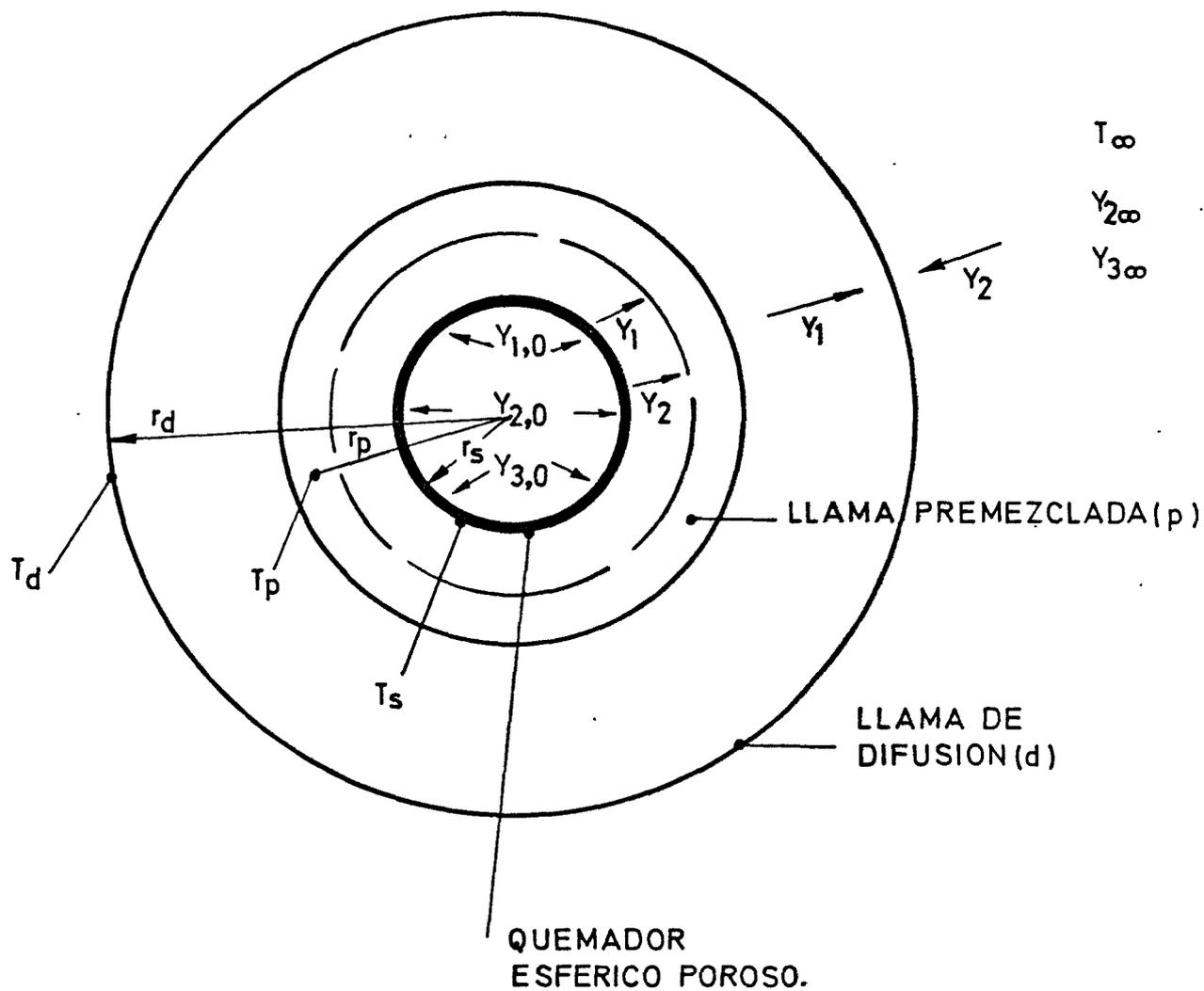


FIG.3-3

3.3.2 Ecuaciones fundamentales y condiciones de contorno.

Teniendo en cuenta las hipótesis mencionadas en 3.3.1 y considerando estado estacionario, las ecuaciones fundamentales del proceso, son las siguientes:

Continuidad de las especies:.

$$\rho V \frac{\partial Y_i}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho D \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + w_i \quad (3-1)$$

Energía:

$$\rho V \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{K}{c_p} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - w_1 \frac{q}{c_p} \quad (3-2)$$

Entre las distintas velocidades de reacción existen las relaciones:

$$w_2 = \nu w_1 \quad (3-3)$$

$$w_3 = -(1+\nu) w_1 \quad (3-4)$$

Para la velocidad de reacción w_1 se tomará la siguiente expresión:

$$w_1 = -Y_1 Y_2 f(T) \exp \left(- \frac{T_a}{T} \right) \quad (3-5)$$

correspondiente a una reacción global de 2° orden. Las condiciones de contorno en el infinito fijan la composición y temperatura de la atmósfera. Dentro del quemador poroso se supondrá que no existe reacción química, y en su superficie se establecerá que el calor que se le comunica por conducción se invierte

en calentar el gas en el interior del mismo, no teniendo en cuenta en este balance los fenómenos de radiación.

3.3.3 Solución de las ecuaciones

Tomando el número de Lewis:

$$L = \frac{K}{\rho c_p D} \quad (3-6)$$

igual a la unidad, y adoptando como nuevas variables:

$$X_1 = Y_1 + \frac{c_p T}{q} \quad (3-7)$$

$$X_2 = \frac{Y_2}{v} + \frac{c_p T}{q} \quad (3-8)$$

$$X_3 = -\frac{Y_3}{1+v} + \frac{c_p T}{q} \quad (3-9)$$

resulta para las ecuaciones (3-1) y (3-2):

$$\rho V \frac{\partial X_i}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho D \frac{\partial X_i}{\partial r} \right) \quad (3-10)$$

La solución general de esta ecuación viene dada por:

$$X_i = X_{i\infty} - \frac{X_i - X_{is}}{1 - e^{-r^*/r_s}} \left(1 - e^{-r^*/r} \right) \quad (3-11)$$

en la que:

$$r^* = \frac{\dot{m}}{4\pi\rho D} \quad (3-12)$$

es una constante con dimensiones de una longitud, y \dot{m} es el gasto másico, dado por:

$$\dot{m} = 4\pi r^2 \rho V = \text{cte.} \quad (3-13)$$

De acuerdo con lo anterior se pueden expresar las fracciones másicas en función de las temperaturas:

$$Y_1 = A + B \frac{1 - e^{-r^*/r}}{1 - e^{-r^*/r_s}} - \frac{c_p T}{q} \quad (3-14)$$

$$Y_2 = C + E \frac{1 - e^{-r^*/r}}{1 - e^{-r^*/r_s}} - \frac{c_p T}{q} v \quad (3-15)$$

en las que:

$$A = \frac{c_p T_\infty}{q} \quad (3-16)$$

$$B = Y_{1s} + \frac{c_p (T_s - T_\infty)}{q} \quad (3-17)$$

$$C = \frac{v c_p T_\infty}{q} + Y_{2\infty} \quad (3-18)$$

$$E = v \left[\frac{c_p (T_s - T_\infty)}{q} + \frac{Y_{2s}}{v} - \frac{Y_{2\infty}}{v} \right] \quad (3-19)$$

Los valores de Y_{1s} , Y_{2s} y T_s se determinarán más adelante.

3.3.4 Temperatura de la llama premezclada

Se calcula esta temperatura haciendo igual a cero la fracción másica de la especie 2, que es la del infinito. De la ecuación (3-14), resulta:

$$v \frac{c_p T_p}{q} = C + E \frac{1 - e^{-r^*/r_p}}{1 - e^{-r^*/r_s}} \quad (3-20)$$

donde r_p es el radio de la llama premezclada.

El campo de temperaturas entre el quemador poroso y la llama premezclada se obtendrá resolviendo (3-1), (3-2) con el término de reacción igual a cero y condiciones de contorno apropiadas. Resulta:

$$T = T_s + \frac{e^{-r^*/r} - e^{-r^*/r_s}}{e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s}} (T_p - T_s) \quad (3-21)$$

Análogamente las concentraciones también podrían ser calculadas, aunque pueden ser deducidas de forma más simple utilizando las expresiones (3-14) y (3-15).

3.3.5 Condiciones en la superficie del quemador poroso.

Las condiciones en la superficie del quemador poroso (subíndice s) no son conocidas. Su valor se obtendrá en función de las condiciones de inyección estableciendo las condiciones apropiadas de conservación de las especies y de conservación de la

energía, lo que requiere el conocimiento de las derivadas de Y y T en la superficie de la esfera:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_s} = \frac{r^*}{r_s^2} \frac{e^{-r^*/r_s}}{e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s}} (T_p - T_s) \quad (3-22)$$

$$\left(\frac{\partial Y_1}{\partial r}\right)_{r=r_s} = -\frac{r^*}{r_s^2} e^{-r^*/r_s} \left[\frac{B}{1 - e^{-r^*/r_s}} + \frac{c_p (T_p - T_s)}{q} \frac{1}{e^{-r^*/r_s} - e^{-r^*/r_p}} \right] \quad (3-23)$$

Entonces Y_{1s} y T_s se determinan mediante las ecuaciones:

$$\dot{m} (Y_{1s} - Y_{10}) = 4\pi r_s^2 \rho D \left(\frac{\partial Y_1}{\partial r}\right)_{r=r_s} \quad (3-24)$$

$$\dot{m} c_p (T_s - T_o) = 4\pi r_s^2 K \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=r_s} \quad (3-25)$$

$$Y_{10} = Y_{1s} + e^{-r^*/r_s} \left[\frac{B}{1 - e^{-r^*/r_s}} + \frac{c_p (T_p - T_s)}{q} \frac{1}{e^{-r^*/r_s} - e^{-r^*/r_p}} \right] \quad (3-26)$$

$$T_o = T_s - \frac{e^{-r^*/r_s} (T_p - T_s)}{e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s}} \quad (3-27)$$

Las ecuaciones (3-26) y (3-27) relacionan la temperatura y fracción másica en la inyección con las de la superficie.

de la esfera porosa. Un cálculo análogo nos daría para la Y_2 :

$$Y_{20} = Y_{2s} + e^{-r^*/r_s} \left[\frac{E}{1 - e^{-r^*/r_s}} + \frac{c_p (T_p - T_s)}{q} \frac{1}{(e^{-r^*/r_s} - e^{-r^*/r_p})} \right] \quad (3-28)$$

3.3.6 Estudio de la llama premezclada

La llama premezclada se supone dividida en dos partes, una de transporte y otra de reacción. La zona de transporte está descrita por la ecuación (3-21) y en realidad abarca desde la superficie de la esfera hasta la zona de reacción. Quizás, por tanto, convenga más bien hablar de la llama como si fuese únicamente la zona de reacción, aunque como se verá existen casos particulares como el que se estudia más adelante en que la zona de transporte es muy delgada y entonces realmente la llama premezclada se compone de las zonas de transporte y de reacción, este caso corresponde a velocidades de soplado fuertes. En cualquier caso, supondremos que en la zona donde hay reacción química se cumplen las siguientes hipótesis:

1°) Llama muy delgada comparada con r_s

2°) Temperatura próxima a la T_p

$$\frac{T - T_p}{T_p} \approx 0 \left(\frac{T_p}{T_a} \right) \ll 1 \quad (3-29)$$

3°) Concentración de Y_2 muy pequeña.

Estas suposiciones están todas basadas en que la temperatura de activación $T_a \gg T_p$, esto da como consecuencia el que el término de reacción química sea extraordinariamente sensible a la temperatura, y que en cuanto la temperatura decaiga por debajo de T_p en un orden de magnitud de $\frac{T_p^2}{T_a}$ se pueda considerar despreciable. Por tanto, la ecuación que describe la zona de reacción química es:

$$\frac{K}{c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{q}{c_p} Y_2 Y_1(T_p) f(T_p) \exp\left(-\frac{T_a}{T_p}\right) \exp\left(\frac{T_a(T_p - T)}{T_p^2}\right) \quad (3-30)$$

Donde en el segundo término se ha tomado para la temperatura el valor $T = T_p$ en todos los términos, excepto en el exponencial que ha sido linealizado, y a la hora de calcular Y_2 . Tanto Y_1 como Y_2 se expresan como funciones de la temperatura mediante las ecuaciones (3-14) y (3-15). La solución de (3-30) debe ser tal que empalme a la izquierda con (3-21) (solución sin reacción química) y a la derecha con la solución que correspondería a que $Y_2 = 0$ (ver ecuación (3-15)). Estas dos condiciones se expresan matemáticamente:

$$v \frac{c_p T}{q} \rightarrow C + E \frac{1 - e^{-r^*/r}}{1 - e^{-r^*/r_s}} \quad \text{A la derecha} \quad (3-31)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \rightarrow \frac{r}{r_p^2} \frac{e^{-r^*/r_p}}{e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s}} (T_p - T_s) \quad \text{A la izquierda} \quad (3-32)$$

Donde este último término se ha obtenido derivando la ecuación (3-21) y particularizando para $r = r_p$.

La ecuación (3-30) con las condiciones de contorno (3-31) y (3-32) puede ser tratada mediante el método matemático expuesto en la referencia 3-3. Para ello hay que reducirla a una ecuación modelo mediante un cambio apropiado de variables

$$\gamma = \frac{-Ee^{-r^*/r_p}}{1 - e^{-r^*/r_s}} \frac{r^*}{r_p} \frac{q}{c_p} \frac{T_a}{T_p^2} \left(\frac{r}{r_p} - 1 \right) - \frac{T - T_p}{T_p^2/T_a} \quad (3-33)$$

$$-\zeta = \left(\frac{r}{r_p} - 1 \right) \frac{T_a}{T_p^2} \frac{r^*}{r_p} e^{-r^*/r_p} \left[\frac{T_p - T_s}{e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s}} + \frac{Eq/c_p}{1 - e^{-r^*/r_s}} \right] + p_0 \quad (3-34)$$

Donde p_0 viene dado por la ecuación:

$$2Y_{1p} f(T_p) \exp\left(-\frac{T_a}{T_p}\right) \frac{c_p}{K} \frac{r_p^4}{r^{*2}} \left(\frac{c_p}{q} \frac{T_p^2}{T_a}\right)^2 \exp(p_0 m) \times$$

$$\frac{1}{\left[\frac{c_p}{q} (T_p - T_s) \frac{e^{-r^*/r_p}}{e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s}} + E \frac{e^{-r^*/r_p}}{1 - e^{-r^*/r_s}} \right]^2} = 1 \quad (3-35)$$

Mediante dicho cambio de variables las ecuaciones (3-30), (3-31) y (3-32) quedan reducidas a:

.....

$$\gamma \exp(-\gamma + m\zeta) = 2 \frac{d^2\gamma}{d\zeta^2} \quad (3-36)$$

$$\zeta \rightarrow \infty \quad \gamma \rightarrow \zeta + p_0 \quad (3-37)$$

$$\zeta \rightarrow -\infty \quad d\gamma/d\zeta \rightarrow 0 \quad (3-38)$$

donde

$$m = \left[1 + \frac{c_p}{q} (T_p - T_s) \frac{(1 - e^{-r^*/r_s})}{(e^{-r^*/r_p} - e^{-r^*/r_s})} \right]^{-1} \quad (3-39)$$

El problema descrito por las ecuaciones (3-36) a (3-38) es de autovalores y no tiene solución mas que para valores determinados de p_0 ; resolviéndose este problema en la referencia 3.3, en la que se encontró la siguiente correlación:

$$mp_0 = 1.344 m - 4 m^2 \frac{(1-m)}{1-2m} + 3m^3 - \ln(1-4m^2) \quad (3-40)$$

$$m > -0.2$$

$$mp_0 = -\ln(0.6307 m^2 - 1.344 m + 1) \quad m < 0$$

que da el valor de p_0 como función de m con errores relativos menores del 2%. Con esto, la ecuación (3-35) combinada con (3-39) y (3-40) da una relación entre la temperatura de la llama premezclada T_p y su radio r_p , esto es suponiendo que se conozca el factor $f(T_p)$ correspondiente a la reacción química.

3.3.7 Estudio de la llama de difusión

Para el estudio de la llama de difusión supondremos que es infinitamente delgada (Burke-Schuman), entonces, entre la llama premezclada y la de difusión la temperatura se encontrará haciendo $Y_2 = 0$ y desde la llama de difusión hasta el infinito haciendo $Y_1 = 0$. La temperatura y radio de la llama de difusión se encontrará haciendo simultáneamente $Y_1 = Y_2 = 0$. Resulta

$$\frac{c_p T_d}{q} = \frac{Y_{1s} \left(\frac{Y_{2\infty}}{v} + \frac{c_p T_\infty}{q} \right) + \left[Y_{2\infty} \frac{c_p T_s}{q} - Y_{2s} \frac{c_p T_\infty}{q} \right] \frac{1}{v}}{Y_{1s} + \frac{(Y_{2\infty} - Y_{2s})}{v}} \quad (3-41)$$

$$\frac{1 - e^{-r^*/r_d}}{1 - e^{-r^*/r_s}} = \left(\frac{c_p T_d}{q} - A \right) \frac{1}{B} \quad (3-42)$$

3.3.8 Resolución de las ecuaciones

El problema planteado consiste en resolver un sistema de cinco ecuaciones algebraicas (3-20), (3-26), (3-27), (3-28) y (3-35) con cinco incógnitas T_s (temperatura en la superficie del quemador poroso), T_p (temperatura de la llama premezclada), r_p (radio de la llama premezclada), Y_{1s} (concentración en la superficie del quemador poroso), Y_{2s} (idem). Dicho sistema,

aunque algébrico, es complicado particularmente en lo que toca a la ecuación (3-35) que incluye el término de reacción química. No obstante, conocidos los datos del problema su resolución en una máquina calculadora es inmediata.

A continuación se estudia un caso límite en el que la velocidad de inyección o de salida a través de la superficie del quemador poroso es grande. En este caso, la resolución del sistema anterior es más sencilla y puede expresarse analíticamente.

Una vez obtenida la solución del problema anterior, sustituyendo en la ecuación (3-41) se obtiene la temperatura de la llama de difusión T_d .

3.3.9 *Caso en que la Velocidad de Inyección es grande*

Este caso acontece cuando: $r^* \gg r_s$, o bien

$$\frac{D_s}{r_s V_s} \ll 1 \quad (3-43)$$

A temperatura ambiente D_s es del orden de $0,01 \text{ cm}^2/\text{seg}$; r_s es del orden de unos cuantos centímetros y la velocidad V_s , para valores de los caudales para los que pudiera hacerse una correlación al caso de turbinas de gas, es de varias decenas de centímetros/segundo, por lo que (3-43) se cumple en la práctica.

Lo mismo acontece a las temperaturas características de una cámara de combustión, aunque en este caso D es del orden

de $1 \text{ cm}^2/\text{seg.}$

Como se verá más adelante, la suposición de que

$$r^*/r_s \gg 1 \quad (3-44)$$

implica también que:

$$r^*/r_p \gg 1 \quad (3-45)$$

Ecuación (3-20) queda entonces reducida a:

$$T_p = T_s + \frac{qY_{2s}}{vc_p} \quad (3-46)$$

ecuaciones (3-26) y (3-28) dan:

$$Y_{10} = Y_{1s} \quad (3-47)$$

$$Y_{20} = Y_{2s}$$

y ecuación (3-27) proporciona:

$$T_o = T_s \quad (3-48)$$

Entonces la ecuación (3-35) nos dará el radio de la llama. Es más significativo desde un punto de vista físico calcular la velocidad del fluido en la llama en lugar del radio de la misma. En este caso, dicha velocidad vendría dada por:

$$-v^{-2} = \frac{\rho_p}{D_p} \left(\frac{q}{c_p}\right)^2 \left(\frac{T_a}{T_p}\right)^2 \frac{Y_{20}^2}{2(Y_{20} - vY_{10})v} \frac{1}{f(T_p) \exp - \left(\frac{T_a}{T_p}\right)} \quad (3-49)$$

(para este caso particular $m \rightarrow 0$ (ver ecuación (3-39)) por lo

que p_{0m} también tiende a cero), en esta expresión no aparece para nada r_p ; la explicación de esto es que dicha expresión re presenta la velocidad de propagación de una llama plana premezclada en un medio en el que hay condiciones uniformes delante y detrás. En efecto, el hecho de que $r^* \gg r_s$, $r^* \gg r_p$ quiere decir que prácticamente hasta justo delante de la llama las condiciones son uniformes e iguales a la de inyección y que detrás varían lentamente en distancias del orden de r_s , mientras que un examen de la ecuación (3-21) puede demostrar que la zona en la que la temperatura aumenta desde T_s hasta T_p es de un espesor mucho más pequeño, como lo demuestra el siguiente cálculo: Si

$$r_p - r \approx 0(r_p) \quad e^{-r^*/r} \ll e^{-r^*/r_p} \quad (3-50)$$

pero por otra parte:

$$e^{-r^*/r_s} \ll e^{-r^*/r_p} \quad (3-51)$$

y, por tanto, el segundo sumando del segundo miembro de (3-21) sería despreciable. En realidad, dicho segundo sumando puede escribirse en la forma:

$$\frac{e^{-r^*/r}}{e^{-r^*/r_p}} (T_p - T_s)$$

y en la zona de transporte debe ser de orden unidad, esto es:

$$e^{-\frac{r^*}{r} + \frac{r^*}{r_p}} \approx 0 \quad (1) \quad (3-52)$$

o lo que es lo mismo

$$\frac{r^*(r_p - r)}{r r_p} \approx 0(1) \quad (3-53)$$

lo que quiere decir que r es muy próximo a r_p

$$\frac{r_p - r}{r_p} \approx 0 \left(\frac{r_p}{r_d^*} \right) \ll 1 \quad (3-54)$$

por tanto, en nuestro caso el perfil de temperaturas es el que se muestra en la Fig.3-4.

Como la velocidad de una llama premezclada en estas condiciones suele ser de unos 50 cm/seg. y habíamos admitido que la de inyección era de unas decenas de dm/seg., podemos, por tanto, suponer que

$$\frac{r_p - r_s}{r_s} \approx 0(1) \quad (3-55)$$

lo que implica que todos los resultados desde (3-46) hasta el (3-48) son, en principio, correctos.

La fórmula (3-41) junto con las (3-46) a (3-48) proporciona, entonces, para la temperatura de la llama de difusión:

$$\frac{c_p T_d}{q} = \frac{Y_{10} \left(\frac{Y_{2\infty}}{v} + \frac{c_p T_\infty}{q} \right) + \left[Y_{2\infty} \frac{c_p T_o}{q} - Y_{20} \frac{c_p T_\infty}{q} \right] \frac{1}{v}}{Y_{10} + (Y_{2\infty} - Y_{20})/v} \quad (3-56)$$

Supongamos que se inyecta en el quemador esférico poroso aire y

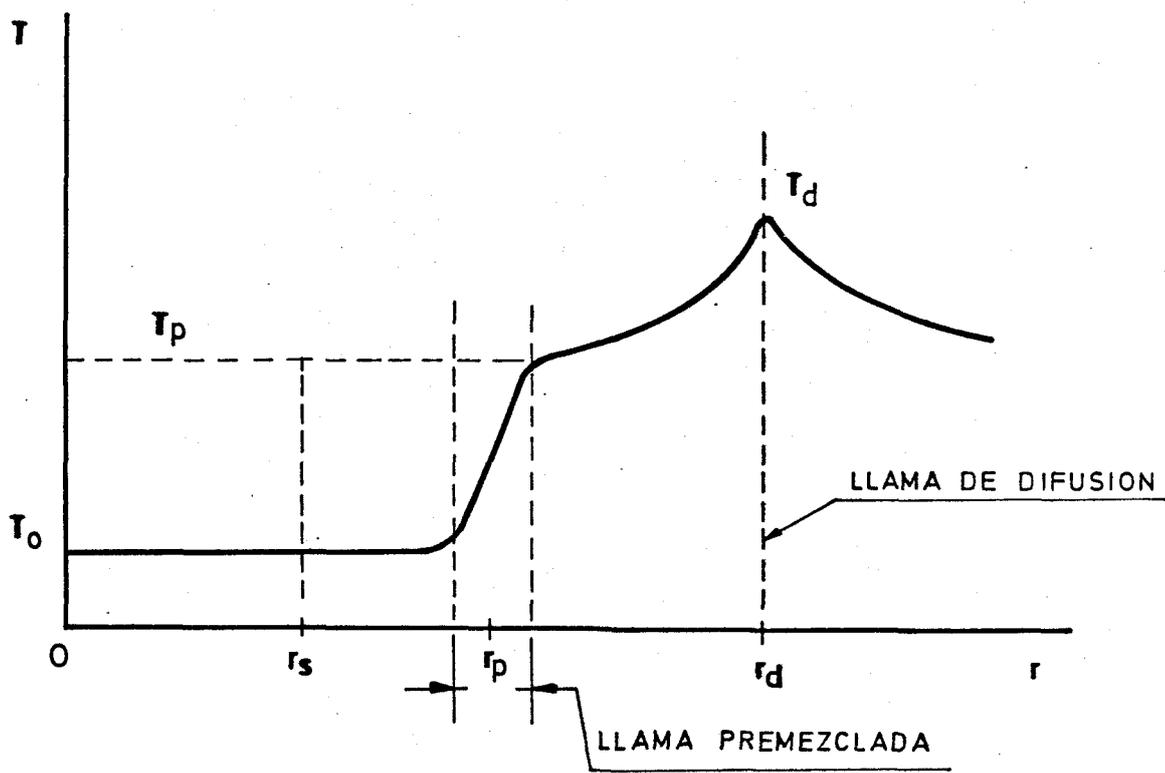


FIG.3-4

combustible y que en el infinito hay aire, entonces:

$$Y_{20} = Y_2 (1 - Y_{10}) \quad (3-57)$$

resultando:

$$\frac{c_p T_d}{q} = \frac{c_p T_\infty}{q} + \frac{Y_{2\infty}}{Y_{2\infty} + v} - \frac{Y_{2\infty} \left(\frac{c_p T_\infty}{q} - \frac{c_p T_o}{q} \right)}{(v + Y_{2\infty}) \left(1 - \frac{Y_{20}}{Y_{2\infty}} \right)} \quad (3-58)$$

como normalmente la temperatura del infinito es mayor que la de inyección, la temperatura de la llama de difusión disminuirá, al aumentar Y_{20} .

Si comparamos la temperatura de la llama de difusión con la de la llama premezclada, nos encontramos con que (de las ecuaciones (3-46), (3-47) y (3-48))

$$\frac{c_p T_p}{q} = \frac{c_p T_o}{q} + Y_{20}/v \quad (3-59)$$

el valor máximo que puede tomar Y_{20} será el correspondiente a inyectar combustible y oxidante en proporción estequiométrica viene dada por

$$Y_{20} = vY_{10} = \frac{vY_{2\infty}}{v + Y_{2\infty}} \quad (3-60)$$

en cuyo caso las temperaturas de las dos llamas se hacen iguales:

$$\left(\frac{c_p T_d}{q} \right)_{\text{mínimo}} = \left(\frac{c_p T_d}{q} \right)_{\text{máximo}} = \frac{c_p T_o}{q} + \frac{Y_{2\infty}}{v + Y_{2\infty}} \quad (3-61)$$

La disminución máxima de la temperatura de la llama de difusión es:

$$(\Delta T_d)_{\text{máx}} = \left(\frac{T_{\infty} - T_0}{1 + Y_{2\infty}/\nu} \right) \quad (3-62)$$

En la figura 3.5 se muestran las temperaturas de la llama premezclada T_p y de difusión T_d en función de la fracción másica Y_{20} inyectada a través del quemador.

3.3.10 Conclusiones

El estudio teórico ha mostrado que efectuando la combustión en dos sectores, o forma escalonada; primero en llama premezclada y luego en llama de difusión, puede conseguirse una importante reducción en la temperatura máxima del proceso. La máxima reducción de temperatura de la llama de difusión (tipo de llama que es la existente en las cámaras de combustión de turbinas de gas) viene dada por (3-62) y en el caso de hidrocarburos, y con $T_{\infty} - T_0 \sim 500^{\circ}$, resulta ser del orden de $450 - 480^{\circ}\text{C}$, lo que es una importante reducción bajo el punto de vista de la formación de óxidos de nitrógeno.

3.4 La producción de NO en llamas de difusión

3.4.1 Introducción

En lo que sigue se expone una teoría de la formación de

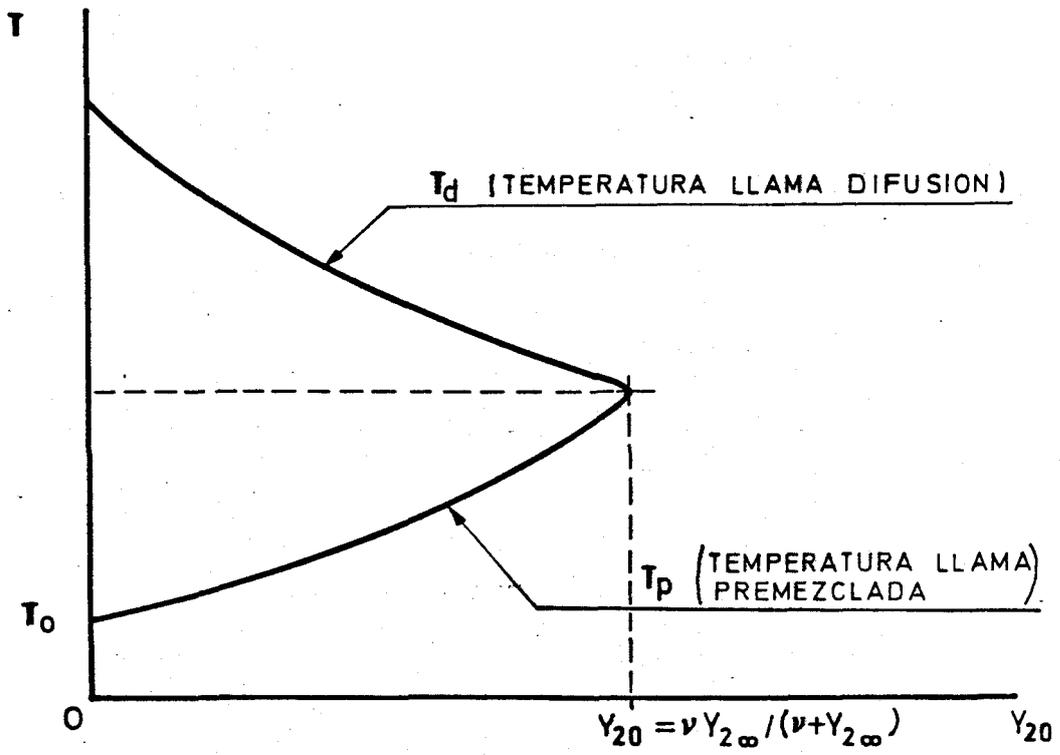


FIG. 3-5

NO en llamas controladas por la difusión. Esta teoría conduce a una expresión analítica de la masa de NO producida por unidad de superficie de la llama en función de la temperatura local máxima de la llama y de ciertos parámetros locales de la misma, como son la cantidad de oxígeno quemado por unidad de superficie y tiempo y el calor que desde la llama fluye hacia el lado que contiene el oxígeno.

Este problema ha sido tratado ya en las referencias 3-4 y 3-5. La referencia 3-4 se refiere a la producción de NO en la combustión de gotas de combustible en atmósfera oxidante, y la referencia 3-5 a la producción de NO en la llama de difusión correspondiente a dos corrientes paralelas de combustible y oxidante. En ambos casos se ha formulado el problema, que queda descrito por un sistema complejo de ecuaciones diferenciales no lineales, el cual ha sido resuelto en algunos casos particulares. En este trabajo, utilizamos el hecho de que la producción de NO es muy sensible con la temperatura para simplificar el problema de la determinación de la producción de NO en cualquier tipo de llamas de difusión. Esta simplificación nos ha permitido obtener una expresión analítica para la producción de NO. Esta expresión puede utilizarse para facilitar el mejor entendimiento de cómo los distintos parámetros de la llama afectan a la producción de NO.

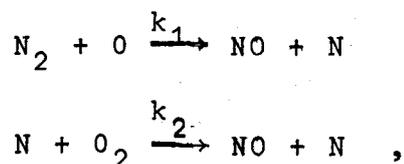
En particular, se muestra cómo, en la combustión de gotas de combustible en atmósfera oxidante, la relación entre la producción de NO y el combustible quemado es proporcional al cuadrado del radio inicial de las gotas; lo cual indica las ventajas de una buena atomización del combustible para reducir la producción de NO.

3.4.2 Teoría General

Cuando la reacción entre el combustible y el oxígeno es suficientemente rápida, ocurre con frecuencia que estos reactivos sólo coexisten en una región muy delgada (llama de difusión), la cual aparece como una superficie que actúa como sumidero para el combustible y el oxígeno y como fuente de productos y calor.

El combustible y el oxidante, separados siempre por la superficie de reacción, acceden a la misma en virtud de los procesos combinados de convección y difusión a través de los productos de la reacción.

Dada la complejidad del proceso, para este estudio se utilizará el modelo cinético de Zeldovich (3-6) para la formación de NO; que como es sabido es



y tenemos en cuenta que siendo muy grande la velocidad de la segunda reacción se mantendrán pequeños los niveles de concentración de N y vendrán dados por la hipótesis de estado estacionario para N ; esto es,

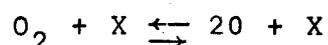
$$k_1 [N_2] [O] = k_2 [N] [O_2] ,$$

entonces la producción global de NO vendrá dada por

$$\frac{d}{dt} [NO] = 2k_1 [N_2] [O]$$

donde $k_1 = 7 \times 10^{13} \exp(-38100/T)$ cm³/mol-seg y T en °K; los paréntesis cuadrados indican concentraciones en moles/cm³.

A su vez, si admitimos que la concentración de O es la que corresponde al equilibrio local de O con O₂, de acuerdo con la reacción



obtendremos

$$[O] / [O_2]^{1/2} = 4,1 \exp(-29500/T) (\text{moles/cm}^3)^{1/2}$$

de manera que la producción de NO vendrá dada por

$$\frac{d}{dt} NO = 5,74 \times 10^{14} [N_2] [O_2]^{1/2} \exp(-67600/T)$$

y la masa producida de NO por unidad de volumen (cm³) y tiempo, w_N vendrá dada por

$$w_{\text{NO}} = 30 \times 5,74 \cdot 10^{14} [\text{N}_2] [\text{O}_2]^{1/2} e^{-67600/T}$$

$$w_{\text{NO}}/\rho = 4,71 \times 10^{16} (M_{\text{NO}}/M)(T/p) [\text{N}_2] [\text{O}_2]^{1/2} \exp(-67600/T) \text{seg}^{-1} \quad (3-63)$$

donde han de escribirse p en atm., T en °K y $[\text{N}_2]$ y $[\text{O}_2]$ en moles/cm³. M es la masa molecular media local y $M_{\text{NO}} = 30$ gr/mol.

El consumo (de reactantes principales y nitrógeno) asociado a la producción de NO es despreciable frente a los consumos asociados a la reacción principal. Esquemáticamente se representa en la figura 3.6 la llama que separa el combustible del oxidante cuando un chorro de combustible se inyecta paralelamente a una corriente de aire. En la Fig.3-7 se dibujan esquemáticamente, para la sección típica BB' de la Fig.3-6 los perfiles de concentraciones de O₂ y N₂ y la distribución de temperaturas obtenida en virtud de la reacción exotérmica

$$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Productos.}$$

En virtud del esquema de Zeldovich sólo habrá producción de NO en las regiones delgadas adyacentes a la llama donde existe O₂ y la temperatura no ha disminuído lo suficiente por debajo del valor T_d (temperatura de la llama adiabática), alcanzado en la zona de reacción infinitamente delgada de la reacción principal. Cuando la temperatura disminuye ligeramente por debajo de T_d la producción de NO se hace despreciable en virtud de la gran sensibilidad de la velocidad de producción de NO con

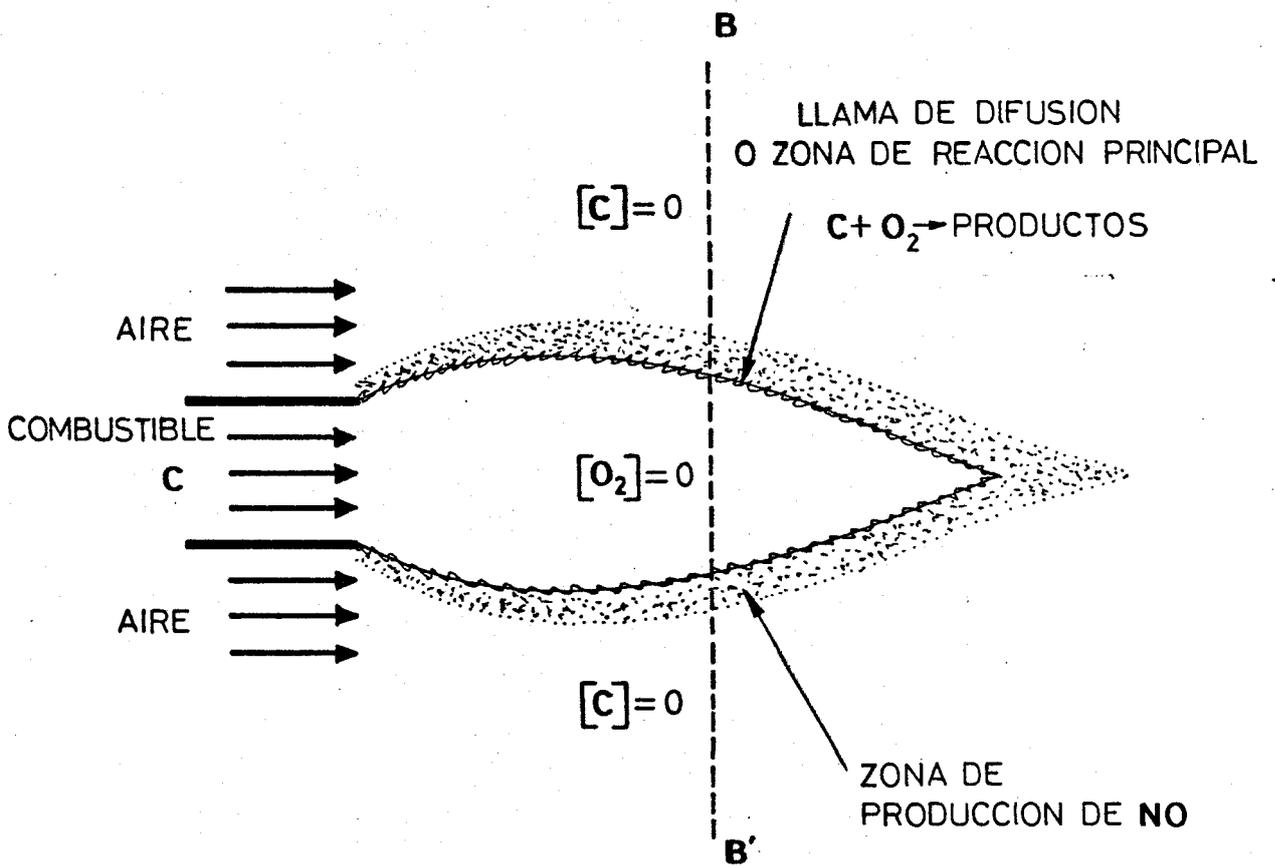


FIG. 3-6

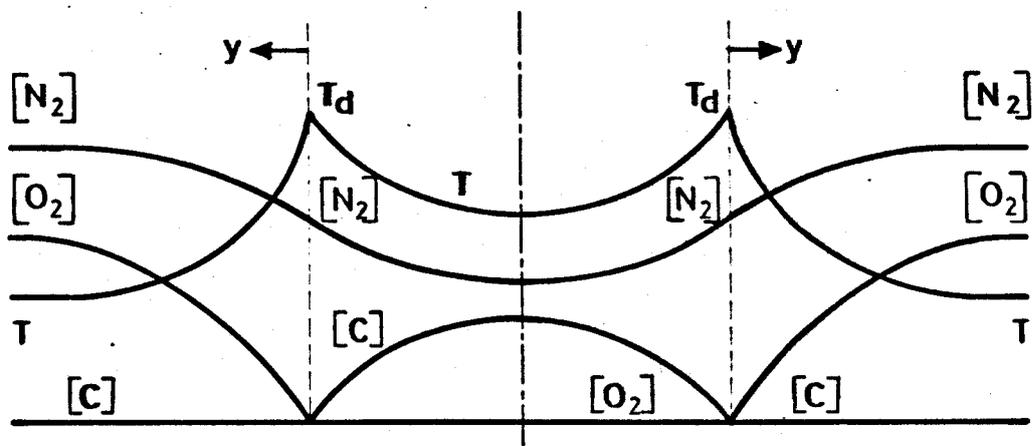


FIG. 3-7

la temperatura; esto es, en virtud del valor tan grande, 67600°K , de la temperatura de activación comparado con las temperaturas usuales de llama (del orden de los 2000°K).

Por ser delgada la zona de producción de NO podremos hablar de la masa de NO producida por unidad de superficie de la llama y por unidad de tiempo (m''_{NO}) y utilizarla como una fuente superficial de masa de valor m''_{NO} situada en la superficie de reacción principal. Para calcular m''_{NO} necesitamos conocer la temperatura local T_d de la llama y el gradiente local de temperaturas hacia la región del O_2 , así como la masa de O_2 que accede por unidad de superficie y tiempo a la llama (o, lo que es lo mismo, el gradiente de $[\text{O}_2]$). El valor de m''_{NO} viene dado por la integral,

$$m''_{\text{NO}} = \int w_{\text{NO}} dy \quad , \quad (3-64)$$

extendida a la zona donde la producción de NO es apreciable, siendo dy el elemento diferencial de distancia a la superficie de reacción principal (ver figura 3-7).

En virtud del valor tan grande del exponente de Arrhenius, $67600/T$, comparado con la unidad, esta integral puede simplificarse al considerar los factores ρ , M^{-1} , p/T y N_2 constantes e iguales al valor que toman en la superficie de reacción principal. Entonces sustituyendo (3-63) en (3-64)

$$m''_{NO} = \rho_d \cdot 4,71 \times 10^{16} (M_{NO}/M_f)(T_d/P_d) [N_2] \int [O_2]^{1/2} \exp\left(-\frac{67600}{T}\right) dy \quad (3-65)$$

Además, al ser muy delgada la zona de producción de NO, $[O_2]$ puede sustituirse por

$$[O_2] = y \left[\frac{\partial [O_2]}{\partial y} \right]_d = y m''_{O_2} / M_{O_2} D_d \quad (3-66)$$

donde m''_{O_2} es la masa que se consume de O_2 por unidad de superficie de la llama y D es el coeficiente de difusión de O_2 en la mezcla. M_{O_2} es la masa molecular de O_2 (32 gramos/mol).

A su vez el factor exponencial puede simplificarse escribiéndolo como $e^{-67600/T_d} \cdot e^{67600(T-T_d)/T_d^2}$ donde $(T-T_d)$ puede escribirse como $(-yq''_{O_2}/k_d)$, q''_{O_2} es el calor que desde la llama fluye hacia la región donde existe O_2 ($y > 0$) y K_d es el valor de la conductividad del calor calculada en las condiciones de la llama.

Así pues,

$$\begin{aligned} \int [O_2]^{1/2} e^{-67600/T} dy &= \left(\frac{m''_{O_2}}{M_{O_2} D_d} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \int_0^\infty \sqrt{y} \exp\left(-\frac{67600}{T_d^2} \cdot \frac{q''_{O_2}}{k_d} y\right) dy = \\ &= \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{m''_{O_2}}{M_{O_2} D_d} \right)^{1/2} \left(\frac{67600}{T_d^2} \frac{q''_{O_2}}{K_d} \right)^{-3/2} \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \end{aligned} \quad (3-67)$$

y, por lo tanto, de (3-66) y (3-67) se obtiene:

$$m''_{NO} = 4,17 \times 10^{16} \left(\frac{M_{NO}}{M_d} \right) \rho_d [N_2]_d (T_d/P_d) \left(\frac{m''_{O_2}}{M_{O_2} D_d} \right)^{1/2}$$

$$\left(\frac{67600}{T_d^2} \frac{q''_{O_2}}{k_d} \right)^{-3/2} \exp \left\{ - \frac{67600}{T_d} \right\} \quad (3-68)$$

En resumen, podemos calcular la masa producida de NO en la llama de difusión en función de la masa de O_2 que accede a la llama, del calor que de ésta fluye hacia la región donde hay oxígeno y de otras variables termodinámicas calculadas en la superficie de reacción. Todos estos datos pueden medirse o calcularse por los procedimientos en uso para el estudio de las llamas de difusión. Haremos a continuación aplicación a las llamas de difusión asociadas a la combustión de gotas de combustible en aire. Debemos indicar que estos resultados se modifican al retener los efectos de velocidad finita de la reacción principal.

Respecto a la producción de NO en la combustión de gotas, podemos anticipar aquí que m''_{O_2} es inversamente proporcional al radio \underline{a} de la gota y que lo mismo ocurre con el flujo de calor q''_{O_2} , por situarse la llama de difusión a una distancia de la superficie de la gota del orden del radio de la misma. Podemos también indicar aquí que las propiedades termodinámicas en la llama son independientes del radio de la gota, con tal que ésta no sea tan pequeña que la llama se extinga. Consecuencia de to

do ello es que

$$m''_{NO} \sim a^{-1/2} a^{3/2} = a$$

esto es, que la masa de NO producida por unidad de superficie de la llama crece linealmente con el radio de la gota. Ahora bien la masa de oxidante, o de combustible, quemada por unidad de superficie es inversamente proporcional a a , según habríamos señalado antes; y por lo tanto la relación, m''_{NO}/m''_c , de la masa de NO producida a la masa de combustible quemada crece como a^2 . Esto es,

$$m''_{NO}/m''_c \sim a^2,$$

lo cual muestra la importancia de una gran atomización del combustible para la reducción de los óxidos de nitrógeno.

3.5 Producción de NO en gotas y masas de gas

3.5.1 *Introducción*

En este apartado se va a estudiar la producción de NO en las llamas de difusión que se forman alrededor de una gota o masa de gas de combustible que se queman en presencia de una atmósfera oxidante, para lo cual se hará uso de los resultados obtenidos en el apartado anterior. El objetivo es determinar la influencia de un buen premezclado de combustible y oxidante en la disminución de producción de óxidos de nitrógeno. Examine-

mos primero el caso en que combustible y aire están en forma gaseosa y dejemos para más adelante el estudio de la combustión de gotas. En un principio, entran en la cámara separadamente los dos gases que se irán mezclando a medida que se mueven a lo largo de la misma. El movimiento a considerar es turbulento y este mismo carácter tendrá el proceso de mezcla. Una masa de gas es arrastrada por el movimiento turbulento en el seno del otro gas y al mismo tiempo es subdividida, siendo éste el proceso que podríamos llamar propiamente turbulento; sin embargo, de forma simultánea ocurre la mezcla a escala molecular en los bordes de las bolsas que se van rompiendo y son arrastrados. Esta difusión molecular es más efectiva a medida que las bolsas son menores ya que su superficie total por unidad de volumen irá aumentando. De no existir la mezcla molecular, en un punto cualquiera de la cámara sólo podría haber combustible o aire pero ninguna concentración intermedia. Esta podríamos decir que es la situación inicial. Matemáticamente expresaríamos esta idea diciendo que la función de probabilidad de distribución de la fracción másica de combustible está formada por dos funciones delta de Dirac situadas en las fracciones másicas 0 y 1 (figura 3-8a). A medida que empieza a actuar la difusión molecular aparecen fracciones másicas intermedias (figura 3-8b), tendiendo la distribución a ser una Gaussiana centrada alrededor de la relación global combustible/aire (figu-

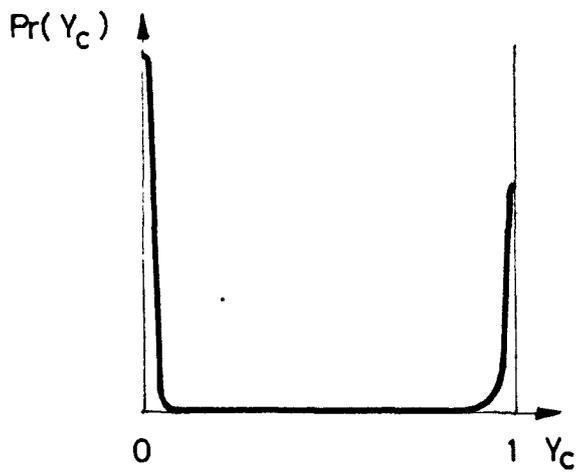


FIG. 3-8a

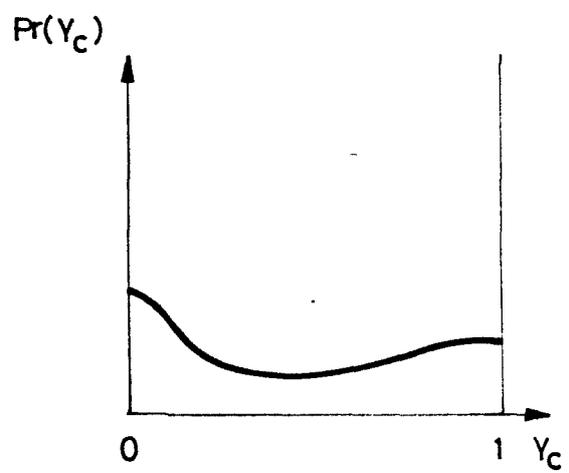


FIG. 3-8b

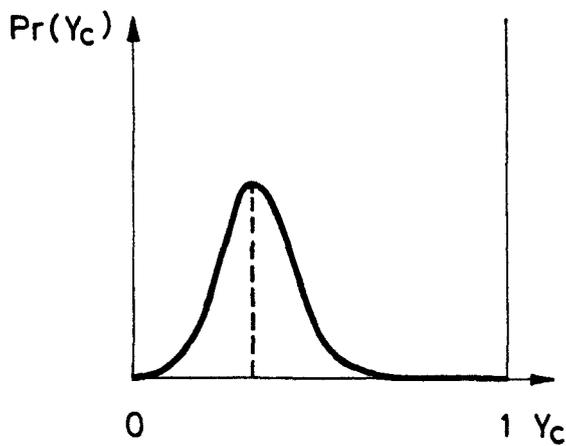


FIG. 3-8c

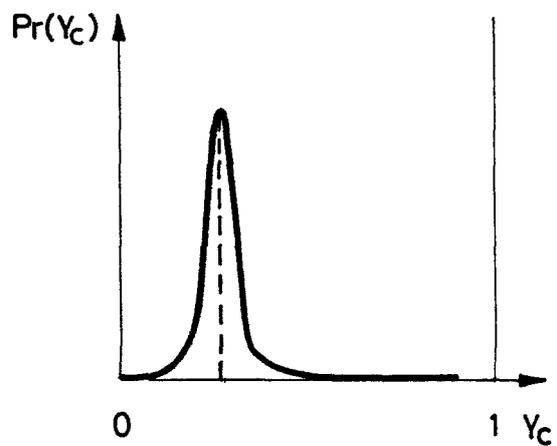


FIG. 3-8d

ra 3-8c). Finalmente, la desviación típica de dicha Gaussiana se irá haciendo cada vez más pequeña (figura 3-8d) hasta convertirse en una función delta de Dirac situada en la relación global combustible/aire. Entonces puede decirse que hemos llegado a una situación de mezclado perfecto. Si la ignición se produce después de haberse alcanzado esta situación, aparecerá una llama premezclada que nos quemará totalmente el combustible o el oxidante dependiendo de cual de ellos está en defecto; si se hubiesen inyectado en relación estequiométrica ambos se consumirían totalmente. En contraposición, si la ignición se produce cuando apenas ha habido mezcla a escala molecular, lo que se formarían serían llamas de difusión alrededor de las masas de gas, caso que será el que consideraremos en este trabajo. Puesto que normalmente el combustible está en menor proporción que el aire, consideraremos que las masas de gas corresponden al combustible. Para situaciones intermedias de mezclado se producirán simultáneamente llamas premezcladas y de difusión.

Trabajos sobre producción de óxidos de nitrógeno considerando distribuciones gaussianas han sido llevados a cabo por diversos autores (referencias 3-7, 3-8, 3-9). En todos estos estudios aparecía como problema importante la determinación de la desviación típica de la función de distribución para lo que usaron un modelo propuesto por Corrsin³⁻¹⁰ y Evangelista et al³⁻¹¹.

Los datos necesarios sobre las llamas de difusión alrededor de masas de gas para la aplicación de la teoría del apartado anterior serán obtenidos de la referencia 3-12.

Los resultados de ³⁻¹² son sólo aplicables a procesos de mezcla y combustión laminares y sin convección forzada debida al movimiento relativo de la bolsa de combustible respecto al fluido. Se investigará el límite de aplicabilidad de estas suposiciones encontrándose que el tamaño de las bolsas de gas debe ser del orden de magnitud del núcleo viscoso del movimiento turbulento para poder usar las conclusiones de ³⁻¹².

En el apartado anterior se encontró que cuando el combustible se inyecta en forma de gotas, una buena atomización, o reducción del tamaño de las gotas, reduce la producción de NO. Puesto que, de acuerdo con ³⁻¹², existe, bajo ciertas condiciones, una similitud entre la combustión de masas de gas y de gotas, es de esperar que una progresiva subdivisión de las masas de gas conduzca a la reducción de producción de NO. Sin embargo, este proceso no puede llevarse al límite de radio nulo de la bolsa de gas pues antes es posible que los efectos de difusión hayan entrado a jugar un papel importante. Un premezclado perfecto daría lugar, como vimos antes, a una llama premezclada.

Finalmente, se estudiará la producción de NO en combus-

ti3n de gotas usando, de acuerdo con el apartado anterior, el modelo de velocidad de reacci3n infinita, proceso casi estacionario, temperatura uniforme de la gota igual a la de evaporaci3n correspondiente a la presi3n ambiente, y propiedades uniformes en el infinito. Los resultados muestran una gran similitud con el de combusti3n de bolsas de gas, lo cual es de esperar debido a la similitud de los dos procesos³⁻¹². Como se indic3 en el apartado anterior, un problema similar fue resuelto en la referencia 3-4 aunque al no tener en cuenta la extrema sensibilidad de la producci3n de NO con la temperatura, el autor tuvo que recurrir a la integraci3n num3rica de las ecuaciones lo que implica que en sus resultados no aparece de forma clara la dependencia de la producci3n de NO con los distintos par3metros del problema.

3.5.2 *Campo de concentraciones y temperaturas en torno de una masa de gas que se quema y difunde en una atm3sfera.*

El modelo que se desarroll3 en la referencia 3-12 es como sigue. Una masa esf3rica de gas combustible de radio a y que est3 a una temperatura T_0 se coloca inicialmente en una atm3sfera cuya concentraci3n de oxidante es $Y_{2\infty}$ y su temperatura T_∞ . Se ha supuesto que el proceso es con simetría esf3rica; la llama colocada alrededor de la masa de gas es infinitamente delgada; los pesos moleculares de todas las sustancias

son similares, de tal manera que un peso molecular medio puede ser considerado sin gran error; la temperatura T_∞ es apreciablemente mayor que la de la masa de gas T_0 ; la masa de gas permanece en reposo frente a la atmósfera circundante; las difusividades térmica y másica son iguales (número de Lewis igual a uno).

Bajo estas condiciones se encuentra:

1°) La masa de gas conserva su temperatura inicial T_0 .

2°) Su radio disminuye con el tiempo de acuerdo con la ley:

$$(r_s/a)^2 = 1 - t/t_1 \quad , \quad r_{s0} = a \quad (3-69)$$

$$t_1^{-1} = 2 \frac{T_0}{T_\infty} \frac{D_\infty}{a^2} \left\{ 1 + \frac{q_r}{c_p T_\infty} \ln (1 + Y_{2_\infty}/v) \right\} \quad (3-70)$$

q_r es el calor de reacción por unidad de masa de combustible, c_p es el calor específico por unidad de masa de la mezcla a presión constante, Y_{2_∞} es la concentración másica de oxidante en la atmósfera circundante, v es la relación estequiométrica, y D_∞ es el coeficiente de difusión laminar correspondiente a las condiciones existentes en la atmósfera circundante.

3°) La temperatura de la llama es constante y vale:

$$T_d = T_\infty + \frac{Y_{2_\infty}/v}{1 + Y_{2_\infty}/v} \left(\frac{q_r}{c_p} - T_\infty + T_0 \right) \quad (3-71)$$

4°) En la referencia 3-12 se han encontrado expresiones analíticas que dan la distribución radial de temperaturas. De dichas expresiones se puede obtener la derivada de la temperatura con respecto a la distancia al centro de la gota en la llama y del lado de la misma por la que llega el oxígeno:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_d^+ = - \frac{T_d}{r_d} (r_d/r_s - 1)^{-1} (q_r/c_p - T_\infty + T_o) / (T_\infty - T_o + \frac{Y_{2\infty}}{v} \frac{q_r}{c_p}) \quad (3-72)$$

donde r_d es el radio de la llama. Esta expresión es de interés para cálculos posteriores.

5°) El cociente del radio de la llama y de la gota es constante y vale

$$r_d/r_s = \frac{(1 + Y_{2\infty}/v) \left[\frac{q_r}{c_p T_\infty} (\ln(1 + Y_{2\infty}/v) + 1) \right]}{\frac{q_r}{c_p T_\infty} \ln(1 + Y_{2\infty}/v) (1 + Y_{2\infty}/v) + \frac{Y_{2\infty}}{v} \left(1 - \frac{q_r}{c_p T_\infty} \right)} \quad (3-73)$$

6°) Por ser el número de Lewis igual a uno, las distribuciones de concentraciones y temperaturas son similares. En particular, y para este caso, es necesario conocer la fracción másica de nitrógeno y la derivada espacial de la fracción másica de oxígeno en la llama:

$$Y_{N_2d} = Y_{N_2\infty} / (1 + Y_{2\infty}/v) \quad (3-74)$$

$$\left. \frac{\partial Y_2}{\partial r} \right|_d = \frac{v}{r_s} (1 + Y_{2\infty}/v) \frac{c_p T_\infty}{q_r} \left(\frac{r_s}{r_d} \right) \left(\frac{r_d}{r_s} - 1 \right)^{-1} \left[\frac{Y_{2\infty}}{v} + \frac{c_p}{q_r} / (T_\infty - T_o) \right] \quad (3-75)$$

En el diagrama de la figura 3.9 se presentan las concentraciones de nitrógeno, oxígeno y combustible, estas dos últimas son cero en la llama.

3.5.3 Cálculo de la producción de NO en bolsas de gas

En el apartado 3.4, fórmula (3-68), se obtuvo que la masa de NO producida por unidad de superficie de llama y de tiempo es

$$m''_{NO} = 4,17 \times 10^{16} \left(\frac{M_{NO}}{M_d} \right) \rho_d \left[N_2 \right]_d \left(\frac{T_d}{P_d} \right) \left(\frac{m''_{O_2}}{M_{O_2} D_d} \right)^{1/2} \times \left(\frac{67600}{T_d^2} \frac{q''_{O_2}}{K_d} \right)^{-3/2} \exp \left(- \frac{67600}{T_d} \right) \quad (3-76)$$

Ahora aplicaremos a esta expresión los resultados obtenidos en la referencia 3-12 que acaban de ser resumidos.

En la llama hay N_2 y productos de la combustión, fundamentalmente CO_2 y H_2O . El peso molecular del N_2 es 28 gramos/mol. y las del CO_2 y H_2O 44 y 18 gramos/mol respectivamente. Si se supone que los hidrocarburos que se queman son saturados, $C_n H_{2n+2}$, con n grande, CO_2 y H_2O aparecerán aproximadamente en la misma proporción y el peso molecular de la mezcla en la llama, M_d , se puede tomar aproximadamente igual al del NO que es también la media del de CO_2 y H_2O

$$M_d = 30 \text{ gr/mol.} \quad (3-77)$$

El cálculo de la densidad ρ_d en la llama lo hacemos usando la ecuación de estado:

$$\rho_d = \frac{P_d M_d}{R_u T_d} \quad (3-78)$$

donde R_u es la constante universal de los gases perfectos.

$$R_u = 82,17 \text{ atm} \times \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \frac{1}{^\circ\text{K}} \quad (3-79)$$

La concentración molar de N_2 en la llama se obtiene a partir de la fórmula (3-74)

$$[N_2]_d = \frac{\rho_d}{M_{N_2}} \frac{Y_{N_2\infty}}{1 + Y_{2\infty}/\nu} \quad (3-80)$$

El flujo másico de oxígeno a la llama por unidad de superficie de ésta y de tiempo viene expresado por:

$$m''_{O_2} = D_d M_{O_2} \left[\frac{\partial \{O_2\}}{\partial r} \right]_d = D_d \frac{\partial \rho Y_2}{\partial r} \left[\right]_d = D_d \rho_d \left[\frac{\partial Y_2}{\partial r} \right]_d \quad (3-81)$$

donde el término correspondiente a la derivada de la densidad desaparece por ser cero la concentración de oxígeno en la llama. D_d es el coeficiente de difusión molecular en las condiciones de la llama. El valor de la derivada espacial de la concentración de oxígeno en la llama está calculado en la fórmula (3-75).

El calor que fluye desde la llama hacia el lado del oxidante por unidad de superficie y tiempo es:

$$q''_{O_2} = K_d \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_d^+ \quad (3-82)$$

donde $\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_d^+$ está dado en la fórmula (3-72).

Mediante substituciones de estos resultados en la fórmula (3-76) se obtiene el valor de m''_{N_0} como función de los parámetros

$$p, M_d, Y_{N_{2\infty}}, Y_{2\infty}, v, T_\infty, T_o, q_r, c_p$$

Si se quiere calcular la producción total de NO de una masa de gas debe calcularse la siguiente integral

$$\Pi_{NO} = \int_0^{t_1} 4\pi r_d^2 m''_{NO} dt \quad (3-83)$$

lo que da el resultado

$$\begin{aligned} \Pi_{NO} = & 4,17 \times 10^{16} \left(\frac{M_d}{R_u} \right)^{5/2} \frac{1}{M_{N_2} M_{O_2}^{1/2}} \left(\frac{8\pi/5}{67600^{3/2}} \right) p_d^{3/2} \frac{Y_{N_{2\infty}}}{(1 + Y_{2\infty}/v)^{1/2}} \\ & \times (vT_\infty)^{1/2} \frac{\{T_\infty - T_o + (q_r/c_p)(Y_{2\infty}/v)\}}{(q_r/c_p - T_\infty + T_o)^{3/2}} (r_d/r_s - 1)(r_d/r_s)^3 \\ & \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \frac{T_\infty a^5}{2D_\infty T_o} \frac{1}{\left\{1 + \frac{q_r}{c_p T_\infty} \ln(1 + Y_{2\infty}/v)\right\}} \quad (3-84) \end{aligned}$$

donde Π_{NO} tiene unidades de gramo, a debe ser expresada en cm.

y D_∞ en cm^2/seg . Las unidades de todas las otras cantidades fueron especificadas en el apartado anterior.

La producción de NO por unidad de combustible quemado se obtendrá dividiendo Π_{NO} por la masa correspondiente de combustible

$$\begin{aligned} \frac{\Pi_{\text{NO}}}{\frac{4}{3} \pi \rho_o a^3} &= 5,96 \times 10^7 \frac{p^{1/2}}{M_c} \frac{v^{1/2} Y_{\text{N}_2\infty}}{(1 + Y_{2\infty}/v)} \times \\ &\times \frac{\left(1 - \frac{T_o}{T_\infty} + \frac{Y_{2\infty}}{v} \frac{q_r}{c_p T_\infty}\right)}{\left(\frac{q_r}{c_p T_\infty} - 1 + \frac{T_o}{T_\infty}\right)^{3/2}} \left(\frac{r_d}{r_s} - 1\right) \left(\frac{r_d}{r_s}\right)^3 \times \\ &\times \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \frac{T_\infty}{D_\infty} \frac{1}{\left[1 + \frac{q_r}{c_p T_\infty} \ln\left(1 + \frac{Y_{2\infty}}{v}\right)\right]} a^2 = \\ &= f(p, M_c, T_o, T_\infty, \frac{q_r}{c_p T_\infty}, v, Y_{2\infty}, Y_{\text{N}_2\infty}) a^2 \quad (3-85) \end{aligned}$$

donde M_c es el peso molecular del combustible. Como se predijo anteriormente, la producción relativa de NO disminuye con el cuadrado del radio de las bolsas de gas.

El resultado anterior se simplifica si se tiene en cuenta que en muchas situaciones reales $Y_{2\infty}/v$ es pequeño (1/14 para el caso gasolina/aire).

$$\frac{\Pi_{NO}}{\frac{4}{3} \pi \rho_o a^3} = 5,96 \times 10^7 \frac{p^{1/2}}{M_c} v^{1/2} Y_{N_{2\infty}} \left(\frac{v}{Y_{2\infty}}\right)^4 \frac{1}{\left(\frac{q_r}{c_p T_\infty} - 1 + \frac{T_o}{T_\infty}\right)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \frac{T_\infty}{D_\infty} a^2 \quad (3-86)$$

En este resultado existe la inconsistencia aparente de que la producción relativa de NO se hace infinita cuando $\frac{q_r}{c_p T_\infty} = 1 - \frac{T_o}{T_\infty}$. Esto se explica por el hecho de que entonces la T_∞ se hace igual a la temperatura de la llama, en cuyo caso el procedimiento asintótico de la fórmula (3-67) fallaría. En efecto, entonces no habría flujo de calor, q''_{O_2} , desde la llama hacia el lado del oxidante y la integral de (3-67) divergiría. En este caso límite, que por otro lado es poco realista, habría que recurrir a limitar de alguna manera el campo de producción de NO, que con arreglo al presente modelo es infinito.

Al objeto de que el resultado (3-86) pueda ser representado gráficamente en casos de interés se han tomado los siguientes valores de algunos parámetros que se consideran de valor general para hidrocarburos que se queman en aire. De la referencia 3-4:

$$\rho D = 3 \times 10^{-4} \text{ gr.cm/seg.}$$

por otra parte se ha considerado

$$v = 3,5 \quad , \quad Y_{2\infty} = 0,23$$

con lo que

$$\frac{\Pi_{NO}}{\frac{4}{3} \pi \rho_o r_{so}^3} = 0,535 \times 10^{16} \frac{p^{3/2} a^2}{M_c} \left(\frac{q_r}{c_p T_\infty} \right)^{-3/2} \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \quad (3-87)$$

por otra parte, también se ha considerado que un valor típico de q_r para combustibles usados en aviación es 10000 cal/gr. con lo que q_r/c_p valdría 43300°K. T_d vendría dada por (3-71) donde T_o sería despreciable frente a (q_r/c_p) .

En la figura (3-10) se presenta la producción de NO en partes por millón para lo que se dividiría el resultado (3-87) por la relación aire/combustible y se multiplicaría por 10^6 . En dicha figura aparece en ordenadas la producción de NO directamente para una presión de cámara de 1 atm. un radio de bolsas de 10 μ . y un peso molecular de combustible de 100, como función de la temperatura de cámara, T_∞ . Para otros valores de estos parámetros la operación a hacer es obvia, (fórmula (3-87)) y aparece indicada en la misma figura.

3.5.4 Tamaño de los torbellinos viscosos. Justificación de la teoría.

De acuerdo con la teoría de Kolmogorov de la turbulencia el tamaño de los núcleos viscosos viene dado por

$$\lambda_o \sim L/Re^{3/4} \quad (3-88)$$

En dicha escala los procesos de transporte son de tipo laminar y, por tanto, el tamaño de las bolsas de combustible debería ser de ese orden o menor. En la fórmula anterior L es la longitud característica de los torbellinos grandes, que en nuestro caso puede ser el tamaño de la cámara de combustión y

$$Re = \rho UL/\mu \quad (3-89)$$

donde U es la velocidad característica de esos torbellinos, que en nuestro caso puede ser la media del fluido. μ es la viscosidad.

Por otra parte, en el análisis de la referencia 3-12 se supuso que la bolsa de gas no tenía velocidad de traslación relativa a la atmósfera ambiente, o que su efecto era despreciable. De acuerdo con la referencia 3-13 esto exige que el número de Peclet

$$\frac{aU_r}{D} \ll 1 \quad (3-90)$$

donde U_r es la velocidad relativa y D el coeficiente de difusión. Para gases D y $\frac{\mu}{\rho}$ son muy parecidos y (3-90) es equivalente a:

$$\frac{aU_r \rho}{\mu} \ll 1 \quad (3-91)$$

Si U_{λ_0} es la velocidad correspondiente a los torbellinos viscosos de escala λ_0 se cumple la condición

$$\frac{\lambda_0 U_{\lambda_0}}{\nu} \sim 1 \quad (3-92)$$

Al tomar una escala más pequeña la velocidad característica de esa escala también será menor. De acuerdo con referencia 3-14 el decrecimiento de la velocidad con la longitud para dimensiones características menores que λ_0 será lineal ya que el núcleo viscoso en cierta forma se mueve como una masa rígida. Por otra parte, puesto que la bolsa de gas y el ambiente tienen densidades que no difieren apreciablemente se puede suponer que dichas bolsas de gas siguen a la atmósfera exterior en su movimiento, por lo menos dentro de un cierto orden de magnitud.

En conclusión, se debe cumplir que el tamaño de las bolsas de gas sea inicialmente menor que la longitud λ_0 de los núcleos viscosos.

Tomando como diámetro de cámara 30 cm. y velocidad característica 5×10^3 cm/seg. resulta de (3-88) y (3-89),

$$\lambda_0 \sim 10^{-3} \text{ cm.}$$

3.5.5 Producción de NO en combustión de gotas

En esta sección se van a utilizar los resultados del apartado 3.4 para calcular la producción de NO en una llama de difusión que rodea a una gota que se quema con simetría esférica en una atmósfera en calma y de propiedades uniformes. La llama es infinitamente delgada y en ella las concentraciones

de oxígeno y de combustible son cero. El diagrama de distribuciones de temperaturas y fracciones másicas es muy aproximadamente similar al de la figura 3-9, correspondiente a la combustión de una bolsa esférica de gas, aunque en este caso la fracción másica de combustible en la fase gaseosa en la superficie de la gota no es la unidad y, consiguientemente, la fracción másica de nitrógeno en la superficie de la gota tampoco sería nula. En este caso, la concentración gaseosa de combustible en la superficie de la gota vendría determinada por la condición de que la presión parcial del vapor de combustible es igual a la presión de vapor correspondiente a la temperatura de la gota. Sin embargo, debido al valor elevado del calor de vaporización, si la fracción másica del combustible gaseoso difiere significativamente de cero, la temperatura de la gota debe ser muy aproximadamente igual a la temperatura de ebullición del combustible correspondiente a la presión que allí haya. Supondremos que la gota está a esa temperatura durante todo el proceso de combustión.

El peso molecular de la mezcla gaseosa se supondrá uniforme, esta aproximación se violará cerca de la superficie de la gota donde puede haber una fracción másica apreciable de combustible cuyo peso molecular es mucho mayor que el del aire. Consiguientemente, al igual que en 3.5.2, supondremos que si el gas es perfecto su constante y los calores específicos son

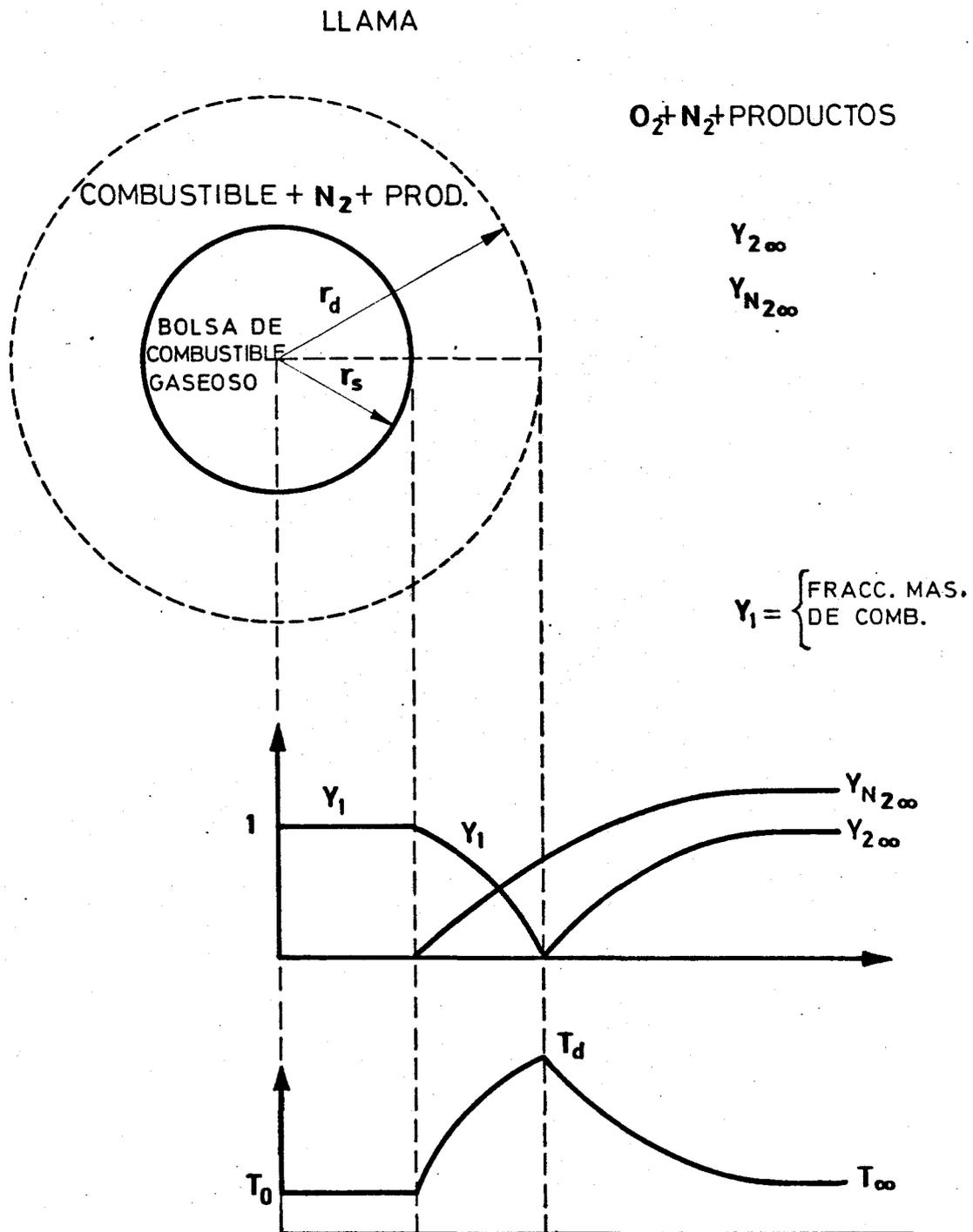


FIG. 3-9

uniformes y no varían con el tiempo. También como en 3.5.2 su pondremos un coeficiente de difusión único inversamente propor cional a la densidad y que es igual a la difusividad térmica.

Una suposición importante se refiere a la casi estacionariedad del proceso relacionada con el hecho de que la densidad del combustible líquido es mucho mayor que la del gas (referencia 3-15). Esta suposición implica que al disminuir muy lentamente el radio de la gota, las variaciones temporales de fracciones másicas y de temperaturas pueden ser despreciadas, al hacer los balances térmicos y de masa de las especies, cuando se comparan con los efectos de difusión, conducción del calor y convectivos. En las referencias 3-13 y 3-16 se ha encontrado que las correcciones a esta teoría casi estacionaria son del orden de la raíz cuadrada del cociente de la densidad del gas dividida por la densidad del líquido. Existe, sin embargo, una dificultad asociada al hecho de que si la llama está localizada muy lejos de la gota dichos efectos no estacionarios pueden ser importantes.

El procedimiento seguido para calcular la producción de NO será muy similar al usado en los apartados 3.5.2 y 3.5.3. La producción másica de NO por unidad de superficie de llama y de tiempo viene dada por la fórmula (3-76) para la que hay que calcular los flujos de calor, q''_{O_2} , y de oxígeno, m''_{O_2} , a la

llama del lado del oxidante por unidad de tiempo y de superficie de la misma. Dichos flujos están relacionados con las derivadas de la temperatura y de la fracción másica de oxígeno (en la llama del lado del oxidante) mediante las ecuaciones (3-82) y (3-81) respectivamente. Dichas derivadas pueden ser obtenidas de las referencias 3-13, 3-15 y 3-16 y son:

$$\left. \frac{\partial Y_2}{\partial r} \right|_{r=r_d}^+ = \frac{v}{r_s} \frac{\{\ln(1 + Y_{2\infty}/v)\}^2}{m_o} \quad (3-93)$$

donde m_o es la constante de vaporización cuyo valor es

$$m_o = \ln \left[1 + \frac{c_p T_\infty}{L} \left(1 - \frac{T_B}{T_\infty}\right) + \frac{q_r}{L} \frac{Y_{2\infty}}{v} \right] \quad (3-94)$$

Siendo T_B la temperatura de ebullición y L el calor de vaporización. La derivada de la temperatura es:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_d}^+ = \frac{1}{r_s} \frac{\{\ln(1 + Y_{2\infty}/v)\}^2}{m_o} \left[\frac{T_\infty + \frac{q_r}{vc_p} Y_{2\infty} - T_B}{1 - e^{-m_o}} - \frac{q_r}{c_p} \right] \quad (3-95)$$

Otros parámetros que aparecen en la fórmula (3-76) son la temperatura de la llama

$$T_d = T_\infty + \frac{Y_{2\infty}/v}{1 + Y_{2\infty}/v} \left[\frac{q_r}{c_p} - \frac{L}{c_p} - (T_\infty - T_B) \right] \quad (3-96)$$

y la concentración molar de nitrógeno en la llama cuyo valor

es el mismo que para las bolsas de gas (3-80). Con las fórmulas (3-93) a (3-96) y (3-81) y (3-82) sustituidas en (3-76) se obtiene, m''_{NO} , con lo que la masa total de NO que produce una gota al quemarse, Π_{NO} , se obtendría de la fórmula (3-83). Para aplicar dicha fórmula, es necesario conocer los radios de la llama y gota como función del tiempo, así como el tiempo de vida de la gota, que también están dados en las referencias 3-13, 3-15 y 3-16,

$$r_s^2 = a^2(1 - t/t_1) \quad (3-97)$$

$$r_d/r_s = m_o / \ln(1 + Y_{2\infty}/v) \quad (3-98)$$

$$t_1 = \frac{a^2}{2D_\infty} \frac{1}{m_o} \frac{\rho_\infty}{\rho_1} \quad (3-99)$$

donde ρ_1 es la densidad del combustible líquido. Estas expresiones indican que el cuadrado del radio de la gota disminuye linealmente con el tiempo y que el cociente del radio de la llama y de la gota permanece constante durante la combustión de la gota, esto también ocurriría para la combustión de bolsas de gas. Esta última característica referente al cociente de los radios de llama y gota puede ser esencialmente errónea si la llama se sitúa muy lejos de la gota (referencias 3-13 y 3-16). Una vez efectuadas las operaciones anteriores se llega a la siguiente producción másica de NO por unidad de combusti-

ble quemado similar a la fórmula (3-86)

$$\frac{\Pi_{NO}}{\frac{4}{3} \pi \rho_l a^3} = 1,98 \times 10^6 p^{1/2} v^{1/2} Y_{N_2\infty} \times \left(\frac{v}{Y_{2\infty}}\right)^4 \times \frac{1}{\left[\frac{q_r}{c_p T_\infty} - \frac{L}{c_p T_\infty} - \left(1 - \frac{T_B}{T_\infty}\right)\right]^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \times \frac{a^2}{D_\infty} T_\infty m^2 \quad (3-100)$$

Donde también se ha usado la aproximación $Y_{2\infty}/v \ll 1$. Las diferencias entre (3-86) y (3-100) se deben por una parte a que en la última no aparece dependencia con el peso molecular, M_c , del combustible ya que al estar éste en forma líquida su densidad no está impuesta por la ecuación de estado. De hecho, el coeficiente numérico de (3-100) es el de (3-86) dividido por el peso molecular del aire. La otra diferencia es el factor m^2 que aparece en (3-100) y no en (3-86). Por otra parte, no existe diferencia en cuanto a la dependencia con el factor $\left(\frac{q_r}{c_p T_\infty}\right)^{3/2}$ ya que $q_r \gg L$. Para hidrocarburos típicos ardiendo en aire la referencia 3-17 da un valor de m_0 muy aproximadamente constante que varía desde 1.75 para el "Pseudocumeno" hasta 2 para el "Isooctano". Con arreglo a esto se ha representado también en la Fig.3-10 la producción de (NO) para combustión de gotas, tomando para m_0 un valor medio de 1,9 y usando las mismas aproximaciones que para la deducción de la ecuación

(3-89) a partir de la (3-86), con lo que la ecuación (3-100) se convierte en

$$\frac{\Pi_{NO}}{\frac{4}{3} \pi \rho_1 a^3} = 0,65 \times 10^{15} p^{3/2} a^2 \left(\frac{q_r}{c_p T_\infty} \right)^{-3/2} \exp\left(-\frac{67600}{T_d}\right) \quad (3-101)$$

En la figura 3-10 se presenta la producción de NO en partes millón para lo que se divide el resultado (3-101) por la relación aire/combustible y se multiplica por 10^6 . Al igual que para la combustión de bolsas de gas aparece la producción de NO para una presión de cámara de 1 atm. y un radio de gota de 10μ . como función de la temperatura de cámara T_∞ . Para otros valores de estos parámetros la operación a hacer es obvia y aparece indicada en la figura 3-10.

Con arreglo a lo antes indicado, las curvas correspondientes a producción de NO en bolsas de gas y gotas, en la figura 3-10, difieren en un factor constante.

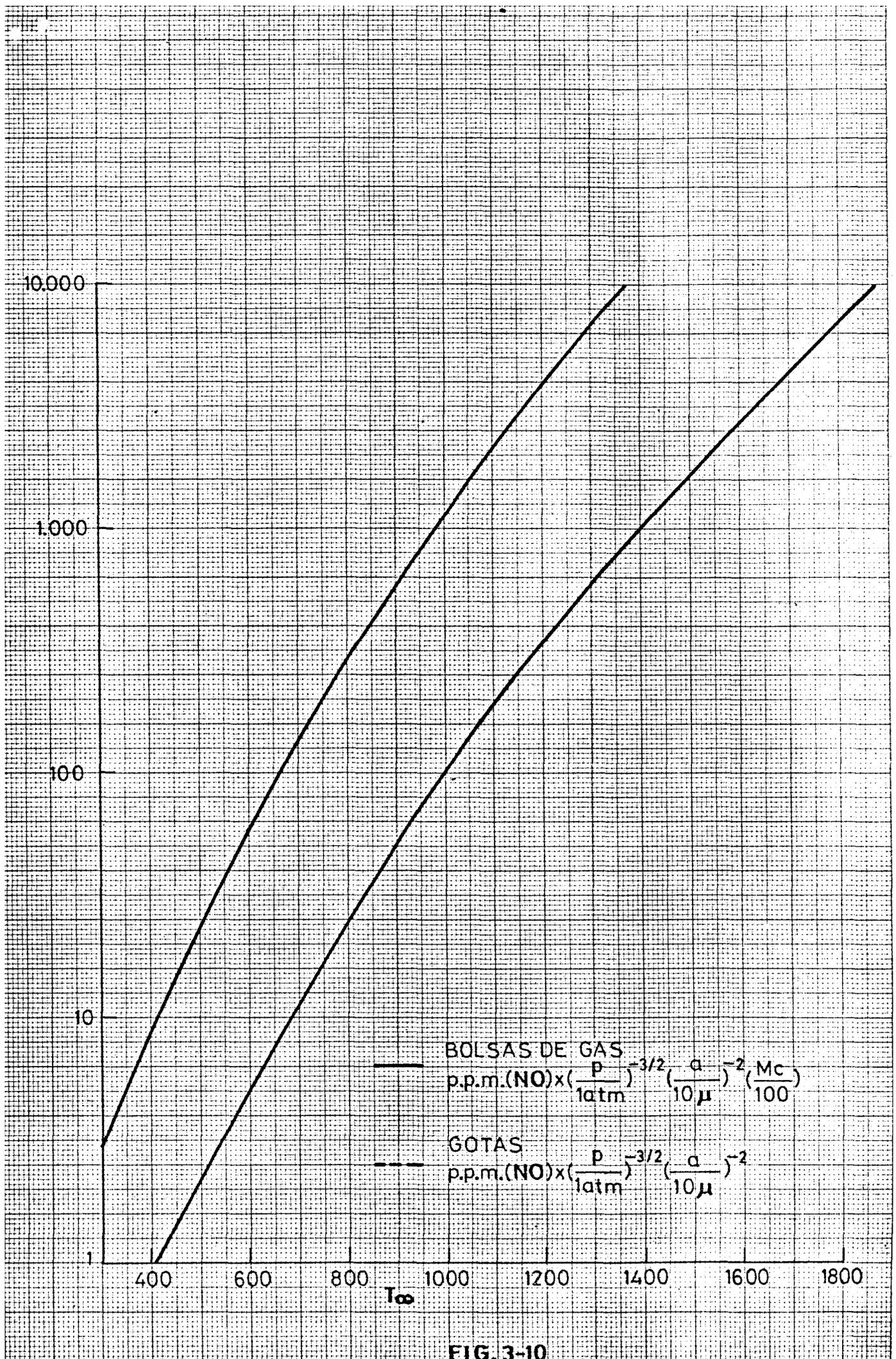


FIG. 3-10

3.6 Referencias

- 3-1 WILLIAMS, F.A. : "Combustion Theory" libro publicado por Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, 1965.
- 3-2 TARIFA, C.S., : VIII Symposium International on Com-
PEREZ DEL NOTARIO, P. bustion. William and Wilkins, 1962.
y
GARCIA MORENO, F.
- 3-3 LIÑAN, A. : "The Asymptotic Structure of Counter-
flow Diffusion Flames for Large Acti-
vation Energies". IV International
Colloquium on Gasdynamics of Explo-
sions and Reactive Systems. La Jolla,
Julio 1973. Va a ser publicado tam-
bién en la revista Astronáutica Acta.
- 3-4 BRACCO, F.V. : "Nitric Oxide Formation in Droplet Dif-
fusion Flames" XIV International
Symposium on Combustion, 1972. Libro
publicado por el Combustion Institute.
Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- 3-5 QUAN, V. et al. : "Nitric Oxide Formation in Turbulent
Diffusion Flames" XIV International
Symposium on Combustion, 1972, Comb.
Inst., Pittsburgh, Penn., USA.
- 3-6 ZELDOVICH, J. : Acta Physicochim., URSS 21, 575, 1945.
- 3-7 APPLETON, J.P. : "The effects of imperfect Fuel-Air
y
HEYWOOD, J.B. Mixing in a burner on NO formation".
XIV Intern. Symp. on Comb., 1972.
Comb. Inst. Pittsburgh, Penn., USA.
- 3-8 FLETCHER, R.S. : "A Model for Nitric Oxide Emissions
y
HEYWOOD, J.B. from Aircraft Gas Turbine Engines"
AIAA paper 71-123, Enero 1971.
- 3-9 MIKUS, T. : Combustion Science and Technology,
y HEYWOOD, Y.B. volumen 4, pag. 149, 1971.

- 3-10 CORRSIN, S. : A.I.Ch.E.J. Vol 3, pag 329,1957.
- 3-11 EVANGELISTA,J.J.: "The Effect of Imperfect Mixing on
SHINNAR, R. Stirred Combustion Reactors".
y XII Symposium International on Combustion.
KATZ, S. The Combustion Institute,
Pittsburgh, Penn, USA, 1969.
- 3-12 TARIFA, C.S. : "A Theoretical Model for the Combustion
CRESPO, A. of Droplets and Gas Pockets in Super-
y critical Combustion", Astronáutica Ac-
FRAGA, E. ta, volumen 17, pag. 685, 1972.
- 3-13 TARIFA, C.S. : "Droplet Combustion at High Pressures
y with Unsteady Effects". Informe Final
CRESPO, A. Científico, Oficina de Investigación
de las Fuerzas Aéreas de E.E.U.U. co-
respondiente al contrato F61052-69-C
0035, 1972.
- 3-14 LEVICH, V.G. : "Physicochemical Hydrodynamics" libro
traducido del ruso al inglés Prentice-
Hall Inc., 1962.
- 3-15 WILLIAMS, F.A. : "On the Assumptions Underlying Droplet
Evaporation and Combustion Theories"
J.Chem.Phys., vol 33, pag 133, 1960.
- 3-16 CRESPO, A. : "Unsteady Effects in Droplet Evaporation
y and Combustion". Artículo aceptado para
LIÑAN, A. publicación en la revista Combustion
Science and Technology. También Informe
Anual para la Oficina de Investigación
de las Fuerzas Aéreas de E.E.U.U. co-
respondiente al contrato 72-2253B,1974.
- 3-17 SPALDING, D.B. : "Some Fundamentals of Combustion."
Libro publicado por Butterworths, Lon-
dres, 1955.
- - - - -

CAPITULO 4º

OXIDOS DE NITROGENO EN MOTORES DE REACCION
Y TURBINAS DE GAS

4. OXIDOS DE NITROGENO EN MOTORES DE REACCION Y TURBINAS DE GAS

4.1 Introducción. Situación actual del problema

Para el estudio de la formación y posible eliminación o reducción de óxidos de nitrógeno en motores de reacción y turbinas de gas, se comenzó por una revisión de la literatura existente sobre el tema (referencias 4-1 a 4-108), que se reseña al final de este Capítulo. Asimismo, se han visitado diversos centros de investigación en fábricas de primera fila de motores de aviación y de automoción y se han asistido a diversos congresos y reuniones sobre temas de contaminación.

Los motores de turbina emiten los contaminantes típicos de todo motor de combustión: óxido de carbono CO, humo, hidrocarburos no quemados HC y óxidos de nitrógeno NO_x. El anhídrido sulfuroso SO₂ no hay que tenerlo en cuenta ya que en los combustibles de aviación, igualmente que en los de automoción, el azufre ha sido previamente eliminado prácticamente en su totalidad.

En comparación con los motores alternativos, los motores de turbina son muy eficientes bajo el punto de vista de la contaminación, mostrándose en la figura 4-1 las emisiones típicas de un turborreactor de aviación.

EMISIONES TÍPICAS DE CONTAMINANTES
EN UN TURBORREACTOR DE AVIACION
(SIN POST-COMBUSTION)

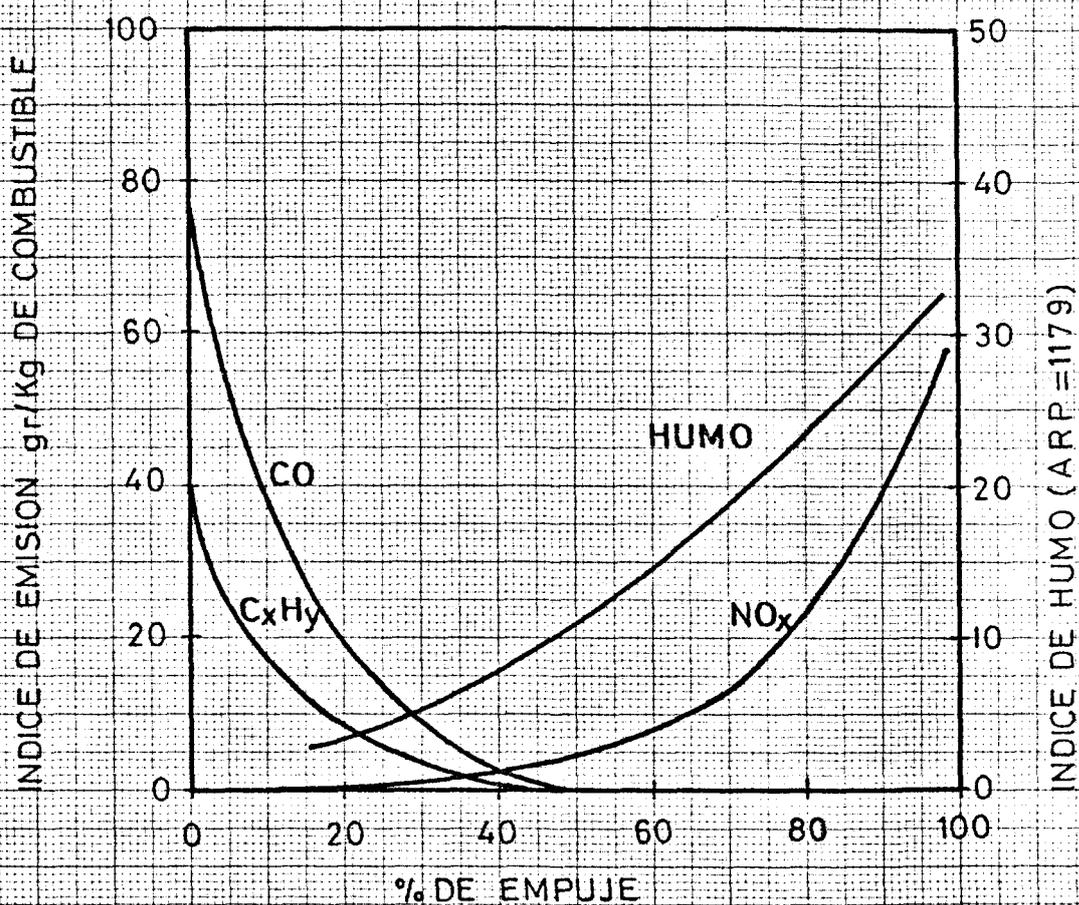


FIG. 4.1

El humo, que aparece en los turborreactores y turbohélices de aviación de alta relación de compresión, ha sido eliminado en todos los motores modernos mediante pequeñas modificaciones en las cámaras de combustión (véanse, por ejemplo, referencias 4-19 y 4-21).

Los índices de las emisiones de óxido de carbono y de hidrocarburos no quemados son muy inferiores a los de los motores alternativos, y, además, sólo existen a regímenes reducidos, lo que es debido a que estos motores funcionan con un gran exceso global de aire. Por el contrario, los índices de emisión de óxidos de nitrógeno son importantes y comparables a los de los motores alternativos (de gasolina y de ciclo diesel). Estas emisiones de óxidos de nitrógeno constituyen, con mucho, el principal problema bajo el punto de vista de la contaminación de los motores de turbina.

El problema de la formación de óxidos de nitrógeno⁴⁻⁴ en las cámaras de combustión de los motores de turbina de gas hay que considerarlo en su doble aspecto de aviación y automoción.

Existen también turbinas de gas industriales, para transporte marítimo y algunas en ferrocarriles, pero, además de ser su número escaso, o proceden de las de aviación o son semejantes a las de automoción en cuanto a contaminación, por lo cual no hay que considerarlas separadamente.

En automoción, el número de turbinas de gas en funcionamiento es muy escaso. No obstante, a causa de la esencial importancia de los problemas de contaminación en automoción, las turbinas de gas están siendo investigadas con la mayor atención como posible futuro sustituto de los motores de pistón, especialmente para camiones y autobuses.

No hay diferencias fundamentales en las formaciones de óxidos de nitrógeno en turbinas de gas de automoción y de aviación (turborreactores, turbohélices y turbinas de gas de helicópteros).

En las cámaras de combustión de estos motores, los dos factores que ejercen mayor influencia en la formación de óxidos de nitrógeno son: la temperatura de combustión y la temperatura de entrada del aire en la cámara de combustión, y ambas temperaturas no difieren en gran manera en estos tipos de motores. En efecto, las relaciones de compresión son, en general, mucho más elevadas en los motores de aviación que en las turbinas de gas de automoción (20/1 - 30/1 en los de gran tamaño, frente a 3/1 - 4/1), pero el aumento de temperatura ocasionado por la mayor compresión adiabática del compresor se compensa por la utilización de cambiador de calor en las turbinas de gas de automoción.

Por otra parte, aunque las temperaturas finales a la salida de las cámaras de combustión suelen ser más elevadas en

los turborreactores y turbohélices, en cambio las temperaturas en la zona primaria son en todos estos motores sensiblemente las mismas y aproximadamente iguales a las temperaturas de com bustión adiabática en mezclas próximas a la estequiométrica; y es precisamente esta zona en la que fundamentalmente se forman los óxidos de nitrógeno. Así pues, puede haber algunas diferencias de tipo cuantitativo, pero los problemas de formación de óxidos de nitrógeno son esencialmente los mismos en todos estos tipos de motores.

En cambio, no son los mismos los requerimientos que se exigen en cuanto a emisiones de contaminantes a ambos tipos de motores.

Aunque la aviación contribuye en muy pequeña proporción a la contaminación en un país*, en los aeropuertos y en sus proximidades pueden originarse zonas de contaminación importantes**, por lo que la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos ha incluido los motores de aviación en sus regulaciones, que a su vez han sido recogidas por la Organización Internacional de la Aviación Civil.

* El combustible quemado en aviación en un país industrializado suele ser del orden del 3% del total del combustible quemado en el país (España 2,7%, USA 3,3%).

** Mediciones llevadas a cabo en diversos aeropuertos, especialmente en el de Heathrow en Londres, han permitido comprobar que la contaminación existente en aeropuertos de mucho tráfico es semejante a la que se produce en grandes aglomeraciones urbanas.

La EPA ha promulgado unas normas de emisión para los motores de nueva construcción, que entrarán en vigor en los próximos años y en forma paulatina; así como otras normas para los motores ya construídos.

Estas normas de índices de emisión se muestran en los cuadros núms. 4-1 y 4-2, con datos complementarios en el cuadro núm. 4-3 y Figs. 4-2a y 4-2b.

Estos índices de emisión se refieren a un ciclo "standard" o normalizado de un avión correspondiente a una maniobra típica en un aeropuerto y en sus proximidades, describiéndose dicho ciclo en el cuadro núm. 4-4.

Independientemente de la contaminación en los aeropuertos y sus proximidades, también es motivo de estudio las consecuencias de emisiones de óxidos de nitrógeno y vapor de agua en la alta atmósfera, que producirán los futuros aviones supersónicos de transporte.

Todos estos problemas de contaminación atmosférica originada por los motores de aviación, han originado numerosos programas de investigación, la mayoría encaminados a resolver los problemas de emisión de óxidos de nitrógeno, programas que se citan en las referencias de este capítulo.

En el caso de las turbinas de gas como motor de automoción, habrán de cumplir los límites drásticos impuestos por

NIVELES DE EMISION DE LA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY PARA NUEVOS MOTORES DE TURBINA DE AVIACION

CONTAMINANTE	CLASE DE MOTOR	INDICE DE EMISION	ENTRADA EN VIGOR
HUMO	T4	< 30*	MOTORES FABRICADOS EN O POSTERIOR A ENERO 1974
"	T2(13.000 Kg. DE EMPUJE 0 >)	SEGUN FIG. 2-a	" " 1976
"	T3	< 25	" " 1978
"	T1, T3 ó T4	SEGUN FIG. 4-2a	" " 1979
"	P2	SEGUN FIG. 4-2b	" " 1979
HIDROCARBUROS	T1	1.6Kg/1000Kg/HORA DE EMPUJE DEL CICLO "STANDARD"	" " 1979
"	T2, T3 ó T4	0.8 "	" " "
"	T2, T3 ó T4	0.4 "	" " 1981
"	P2	26.8/1000 CV/HORA DEL CICLO	" " 1979
OXIDOS DE CARBONO	T1	9.4Kg/1000Kg/HORA DE EMPUJE DEL CICLO "STANDARD"	" " 1979
"	T2, T3 ó T4	4.3 "	" " "
"	P2	26.8/1000 CV/HORA DEL CICLO	" " "
OXIDOS DE NITROGENO	T1	3.7Kg/1000Kg/HORA DE EMPUJE DEL CICLO "STANDARD"	" " 1979
"	T2, T3 ó T4	3 "	" " "
"	P2	12.9/1000 CV/HORA DEL CICLO	" " "

* EL INDICE DE HUMO DETERMINADO CON UN REFLECTOMETRO SEGUN NORMA ASA PARA REFLECCION

DIFUSA N° Ph 2.17 - 1953.

C U A D R O N° 4-2

NIVELES DE EMISION DE LA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY PARA LOS MOTORES YA
CONSTRUIDOS DE TURBINA DE AVIACION*

CONTAMINANTE	CLASE DE MOTOR	INDICE DE EMISION	ENTRADA EN VIGOR
HUMO	T4	< 30	1 ENERO 1974
"	T2, EMPUJE > 13.000 Kg.	SEGUN FIG. 4-2a	1 ENERO 1976
"	T3	< 25	1 ENERO 1978

* LA CONTAMINACION ORIGINADA POR LOS MOTORES ALTERNATIVOS (CLASE P1) NO SE HA INCLUIDO POR SU ESCASA CANTIDAD.

CUADRO N° 4-3CLASES DE MOTORES DE TURBINA

CLASE	DESCRIPCION
T1	TURBORREACTORES DE FLUJO UNICO O DE DOBLE FLUJO, EXCEPTO LA T3, T4 ó T5, LOS EMPUJES MENORES A 3.600 Kgs.
T2	TURBORREACTORES DE FLUJO UNICO O DE DOBLE FLUJO, EXCEPTO LOS T3, T4 ó T5, LOS EMPUJES IGUAL O MAYOR A 3.600 Kgs.
T3	TURBORREACTORES DE DOBLE FLUJO DE LA FAMILIA DEL JT3D*
T4	TURBORREACTORES DE DOBLE FLUJO DE LA FAMILIA DE JT8D**
T5	TURBORREACTORES PARA AVIONES SUPERSONICOS
P1	MOTORES ALTERNATIVOS (DE PISTON) DE AVIACION
P2	TURBOHELICES

* MOTORES DEL PC-8 Y BOEING 707

** MOTORES DEL BOEING 727, PC-9 Y BOEING 737.

C U A D R O N° 4-4

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY CICLO "S T A N D A R D"
 (DESCENSO DESDE 900 METROS, ATERRIZAJE, RODAJES DE LLEGADA Y SALIDA, DESPEGUE Y
 SUBIDA)

OPERACION	TIEMPO (minutos)		REGIMEN DE POTENCIA %	
	CLASE T1 & P2	CLASE T2, T3 & T4	CLASE T1 & P2	CLASE T2, T3 & T4
RODAJE SALIDA	19	19	SEGUN INSTRUCCIONES CASA CONSTRUCTORA	SEGUN INSTRUCCIONES CASA CONSTRUCTORA
DESPEGUE	0.5	0.7	100	100
SUBIDA	2.5	2.2	90	85
APROXIMACION Y TOMA	4.5	4.0	30	30
RODAJE DE LLEGADA	7.0	7.0	SEGUN INSTRUCCIONES CASA CONSTRUCTORA	SEGUN INSTRUCCIONES CASA CONSTRUCTORA

$$\text{INDICE DE EMISION} = \frac{\sum \text{PESOS CONTAMINANTES (CO, HC, NO}_x\text{)} \quad (\text{grs})}{\sum \text{EMPUJES} \times \text{TIEMPOS} \quad (\text{Kg.h})}$$

INDICE DE HUMO
(CLASES T1, T2, T3, T4 Y T5)

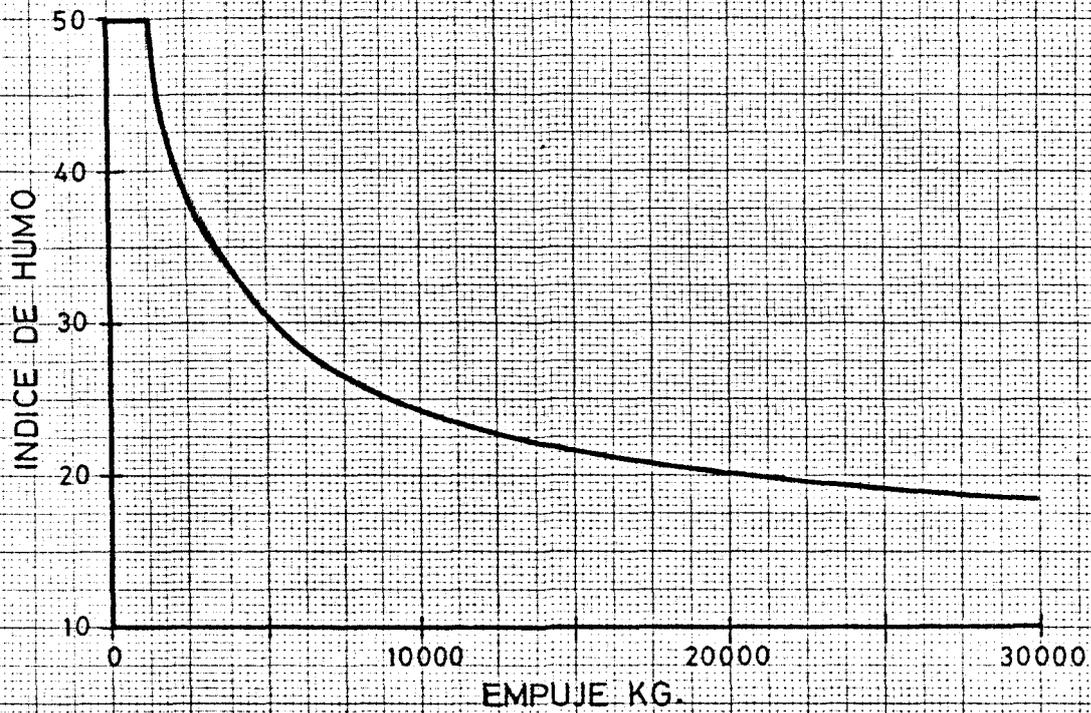


FIG. 4.2a

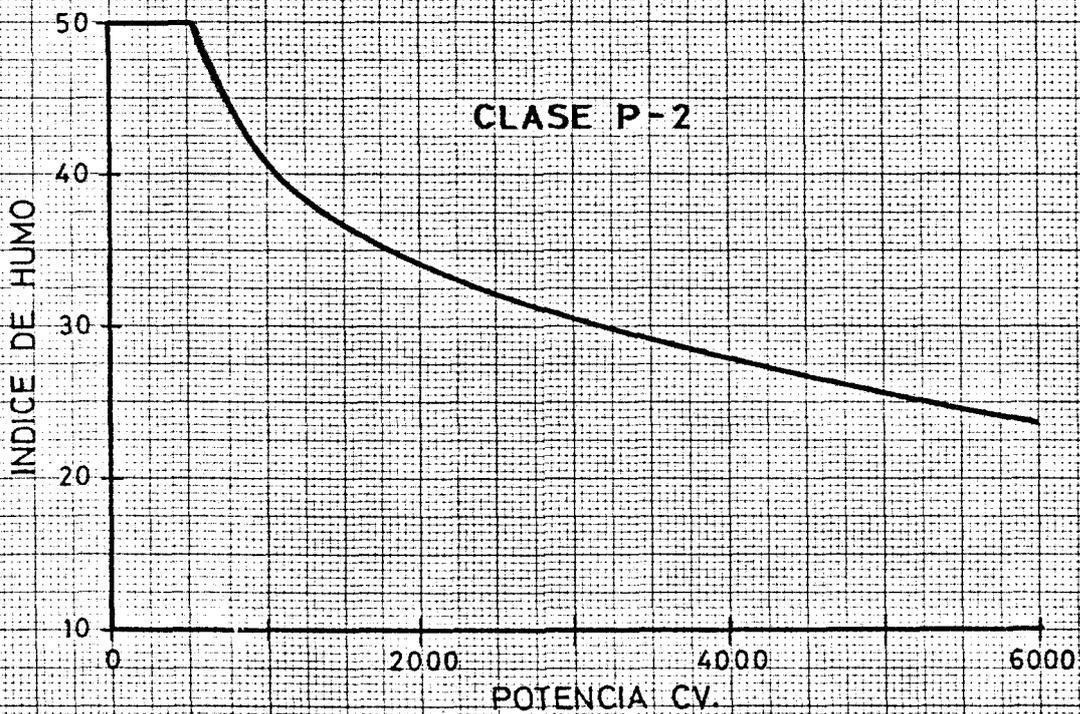


FIG. 4.2b

las autoridades federales de los Estados Unidos (cuadro n° 4-5), límites que probablemente serán aceptados por los demás países industrializados.

Las fechas de entrada en vigor de estos límites de emisión han sido retrasadas recientemente a causa de los elevados costes que originan y sobre todo a causa de la crisis de la energía.

C U A D R O N° 4-5

LIMITES FEDERALES DE EMISION DE VEHICULOS AUTOMOVILES EN
ESTADOS UNIDOS (En gramos/milla)

	Valores típicos de emisión en vehículos sin tratar	Valores máximos exigidos para 1975	Valores máximos exigidos para 1976	Reducción global.
Hidrocarburos no quemados HC	15	0,41	0,41	97%
Oxidos de carbono CO	90	3,4	3,4	96%
Oxidos de nitrógeno NO _x	5	3,1	0,4	92%

Las turbinas de gas podrían cumplir con facilidad los límites de emisión impuestos para 1976 para hidrocarburos no quemados y óxidos de carbono, pero no es así para los óxidos de nitrógeno, ya que sus índices de emisión son del mismo orden de magnitud que los de los motores alternativos.

Es por ello de la mayor importancia reducir las emisiones de NO_x tanto en aviación como en automoción, con lo que esta clase de motores quedaría prácticamente libre de emisiones de contaminantes. Esta es la razón de que se están llevando a cabo importantes programas de investigación especialmente en aviación, cuyas principales líneas de actuación se discutirán brevemente.

Según se ha comprobado experimentalmente los óxidos de nitrógeno se forman en la zona primaria de combustión (Fig.4-3), en la que la relación aire/combustible es igual o ligeramente superior a la estequiométrica, alcanzándose temperaturas de unos 2000 - 2200°C. El tiempo de residencia de las partículas de gases en esta zona es corto, del orden de los 10^{-3} segundos, no existiendo tiempo suficiente para que se alcancen concentraciones de equilibrio para la formación de los óxidos de nitrógeno (NO en su mayor parte). En cuanto el aire secundario se mezcla con los gases de combustión de la zona primaria (Fig.3-1), se produce un inmediato congelamiento de las reacciones de for

ESQUEMA DE UNA CAMARA DE COMBUSTION DE UN TURBORREACTOR O TURBINA DE GAS

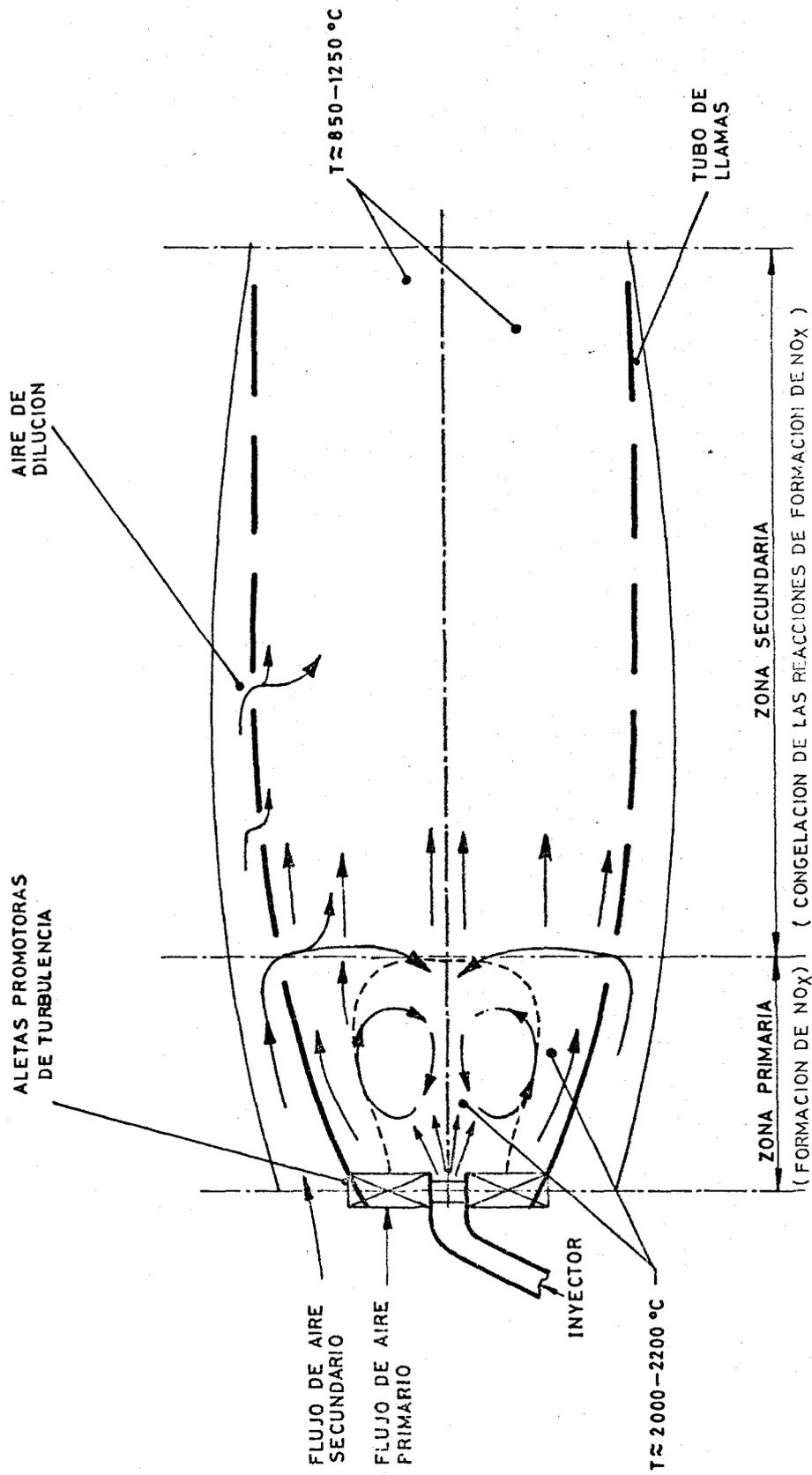


FIG.4-3

mación de los óxidos de nitrógeno, cuya composición queda congelada durante toda la fase de expansión, hasta que salen los gases al exterior.

Ello es debido a la fuerte dependencia de la velocidad de formación de los óxidos de nitrógeno con la temperatura de acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 2°.

Además de estos procesos generales de formación de NO_x , existen fenómenos de tipo local que también influyen en la formación de los óxidos de nitrógeno.

Las llamas existentes en el interior de una turbina de gas son del tipo de difusión, a causa de producirse simultáneamente los procesos de combustión y de mezclado del combustible con el aire y de acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 3°, esto puede dar lugar a elevadas temperaturas locales en los frentes de llama. Además, la combustión en forma de gotas pudiera originar también zonas de elevadas temperaturas alrededor de las mismas, si es que en algún momento ardieran estas gotas individualmente con frentes de llama propios.

Existen, en consecuencia, diversos procedimientos para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Con ligeras modificaciones en las cámaras de combustión actuales, pueden reducirse sustancialmente las emisiones de humo, hidrocarburos no quemados y óxidos de carbono.

No es este el caso de los óxidos de nitrógeno. Pequeñas modificaciones en las cámaras de combustión actuales, como tratar de reducir los tiempos de residencia en la zona primaria, aumentando la turbulencia y disminuyendo el volumen de la misma reduciendo para ello la distancia en que se sitúan los orificios de entrada del flujo secundario, sólo han conducido a reducción del orden del 25% en las emisiones de NO_x , totalmente insatisfactorias,

Homogeneizaciones en el mezclado y mejores pulverizaciones en los sistemas de inyección, también han producido solamente muy pequeñas modificaciones en las emisiones de óxidos de nitrógeno.

La única técnica que permite reducir fuertemente estas emisiones en las cámaras de combustión actuales consiste en inyectar agua pulverizada en la zona primaria. La fuerte reducción de temperatura que se consigue, hace que puedan conseguirse reducciones en las emisiones de NO_x de hasta valores del orden del 80%. No obstante, para conseguir estas reducciones se requieren caudales de agua del orden de la del combustible (Fig.4-4), y aunque este sistema se utilizase solamente para despegue y subida, obligaría a llevar cantidades muy grandes de agua a bordo de los aviones.

Los procedimientos que se están investigando llevan

INFLUENCIA DE LA INYECCION DE AGUA EN LA DISMINUCION DE EMISION DE NO_x (REF. 3-104)

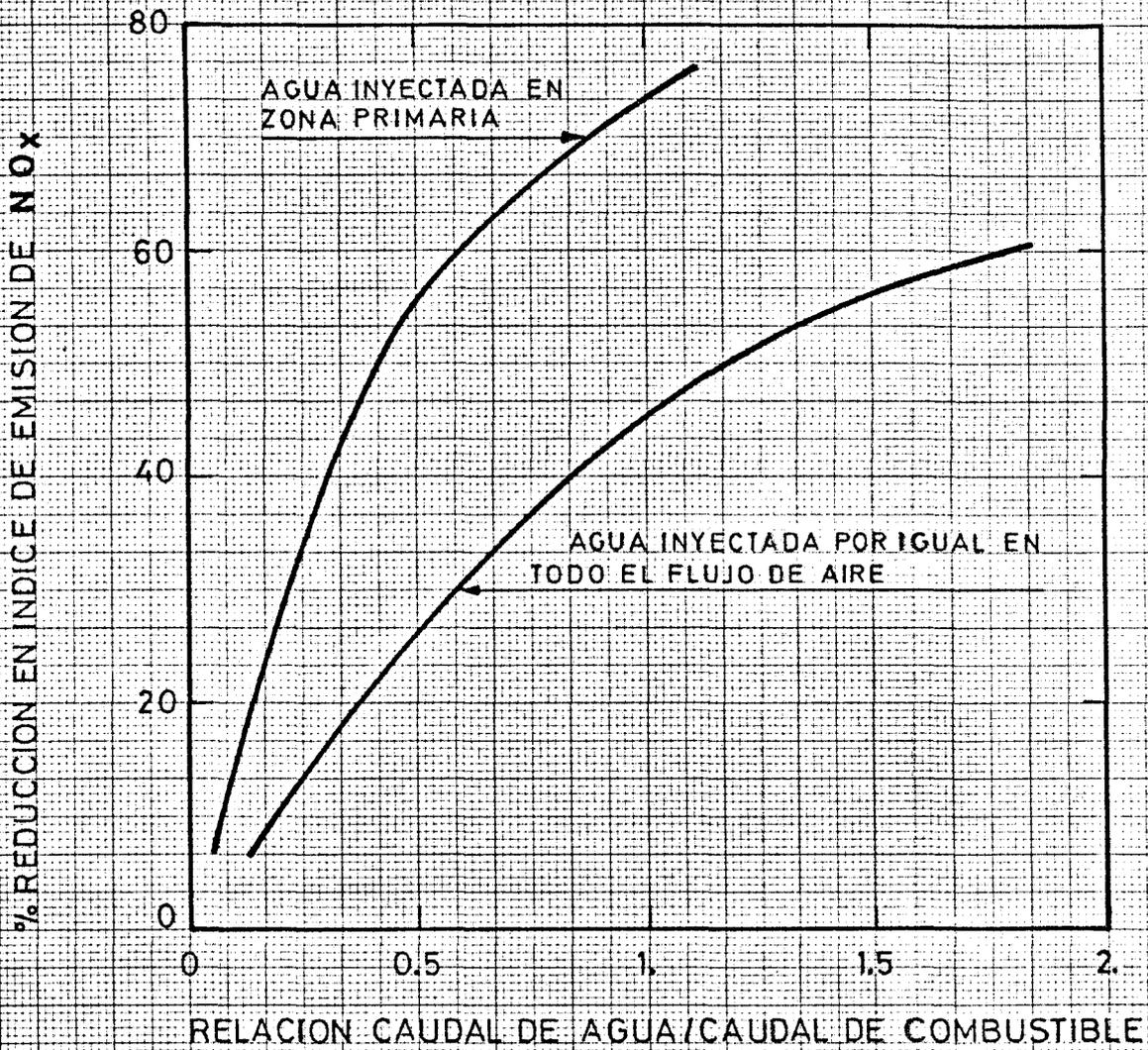


FIG. 4-6

consigo modificaciones importantes en las cámaras de combustión.

Una solución con la que evidentemente se disminuiría considerablemente la emisión de NO_x sería la de reducir las temperaturas en la zona primaria, disminuyendo para ello la relación combustible/aire. Ello llevaría a cámaras de combustión más voluminosas y crearía problemas a regímenes reducidos, en los que la dicha relación combustible/aire disminuye considerablemente. En estas condiciones, a regímenes bajos aumentarían las emisiones de CO y de hidrocarburos no quemados, e incluso disminuiría la altura de vuelo para las que se produce el apagado de la cámara de combustión.

Una solución aproximada de este problema la proporcionan las cámaras de combustión escalonada, como las que está investigando la Pratt and Whitney (Fig.4-5). Con este sistema se emplean dos inyectores, funcionando solamente con el primero a regímenes reducidos y con los dos a regímenes elevados. De esta manera puede funcionar eficientemente con relaciones com bustible/aire en las zonas primarias sustancialmente inferiores a la estequiométrica a todos los regímenes.

Un sistema análogo pero con disposición radial en los escalonamientos está siendo también actualmente investigado por la General Electric.

Con estos sistemas de combustión escalonada se han con-

CAMARA DE COMBUSTION ESCALONADA QUE ESTA SIENDO INVESTIGADA POR LA PRATT WHITNEY (REF.4.86)

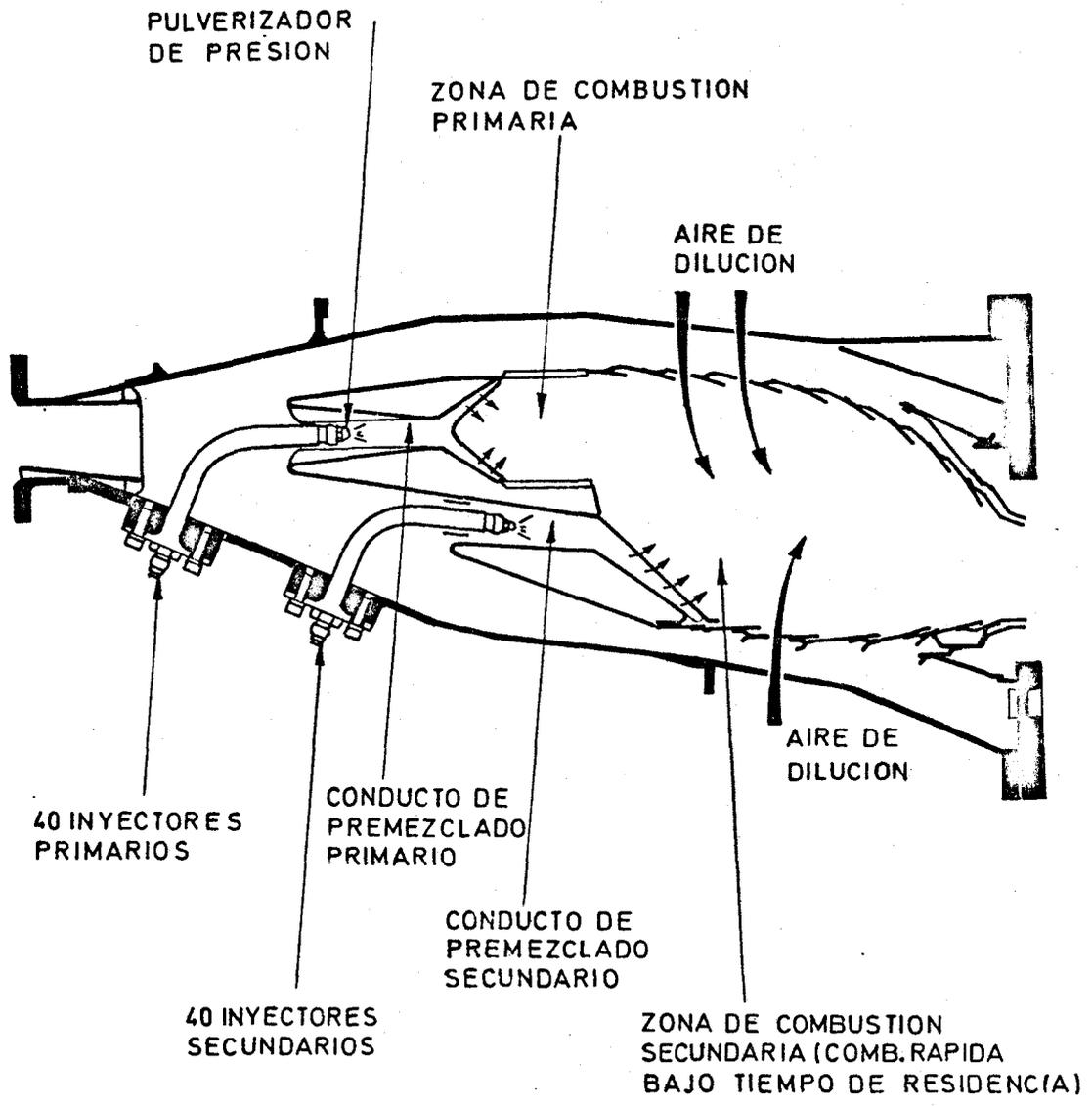


FIG.4-5

seguido índices de emisión de NO_x del orden de 20, y se espera llegar a valores próximos a 10.

Una solución más perfecta del problema la constituirían las cámaras de combustión de geometría variable, en las que pudiese controlarse a todos los regímenes la relación aire primario/aire secundario. Esta solución del problema apenas si ha sido investigada (ref.3-88), y al estudio de información básica sobre la misma se ha dedicado parte de la investigación que se desarrolla en este capítulo.

También falta información sobre la influencia de las condiciones locales de la combustión en la formación de óxidos de nitrógeno, en especial en cuanto concierne a la presencia de gotas de combustible y efectos del grado de mezcla en forma gaseosa; dedicándose el resto de la investigación experimental expuesta en este capítulo al estudio de estos importantes fenómenos.

Para efectuar estos estudios se utilizó una cámara de combustión modificada de un turborreactor De Havilland Goblin, utilizándose la instalación experimental que se describirá en el apartado número 4-2.

En resumen, el programa de investigación ha comprendido los siguientes problemas:

a) Influencia de la relación aire/combustible global en la

formación de óxidos de nitrógeno, y estudio de dicha formación con relaciones variables aire primario/aire secundario.

b) Influencia del tipo de combustible: gasolina, isooctano y butano.

c) Influencia de la presencia de gases condensadas (gotas), durante la combustión, utilizándose para el estudio de este proceso un combustible puro (isooctano) para evitar durante la evaporación posibles cambios de composición en función del tiempo al utilizar una mezcla de hidrocarburos como las existentes en querosenos y gasolinas.

d) Influencia del grado de mezcla.

Para llevar a cabo este estudio se desarrolló un sistema de mezclado anterior a la entrada del aire y combustible gaseoso en la cámara, con diversos grados de premezclado. El grado de mezclado está previsto que se mida con una sonda de alta velocidad de respuesta, desarrollada por Brown y Rebollo (ref. 4-108), habiéndose llegado en esta parte del trabajo hasta el tarado de las sondas y la realización de unas primeras mediciones.

4.2. Instalación experimental

4.2.1 Sistema de alimentación de aire

4.2.1.1. Generalidades

El elemento principal de esta instalación es un ventilador centrífugo de 40 C.V. de potencia, accionado por un grupo de regulación Ward-Leonard, que proporciona un caudal de aire hasta $1 \text{ m}^3/\text{seg}$ a 2900 r.p.m. y un incremento de presión de remanso de 800 mm. de c.a.

Las curvas características del ventilador y un plano del mismo pueden verse en las figuras 4-6 y 4-7 respectivamente.

A dicho ventilador se le ha acoplado una instalación de entrada y otra de salida, que llevan incorporados un dispositivo medidor de gasto, tomas de presión estática, presión dinámica y temperatura; así como la cámara de combustión objeto de los ensayos y un sistema de estrangulación que permite la variación del gasto.

4.2.1.2 Instalación de entrada del ventilador

Teniendo en cuenta, en lo posible, las indicaciones de las normas para este tipo de instalaciones, dadas las limitaciones de espacio disponibles en el laboratorio; se ha dispues

CURVAS CARACTERISTICAS DEL COMPRESOR

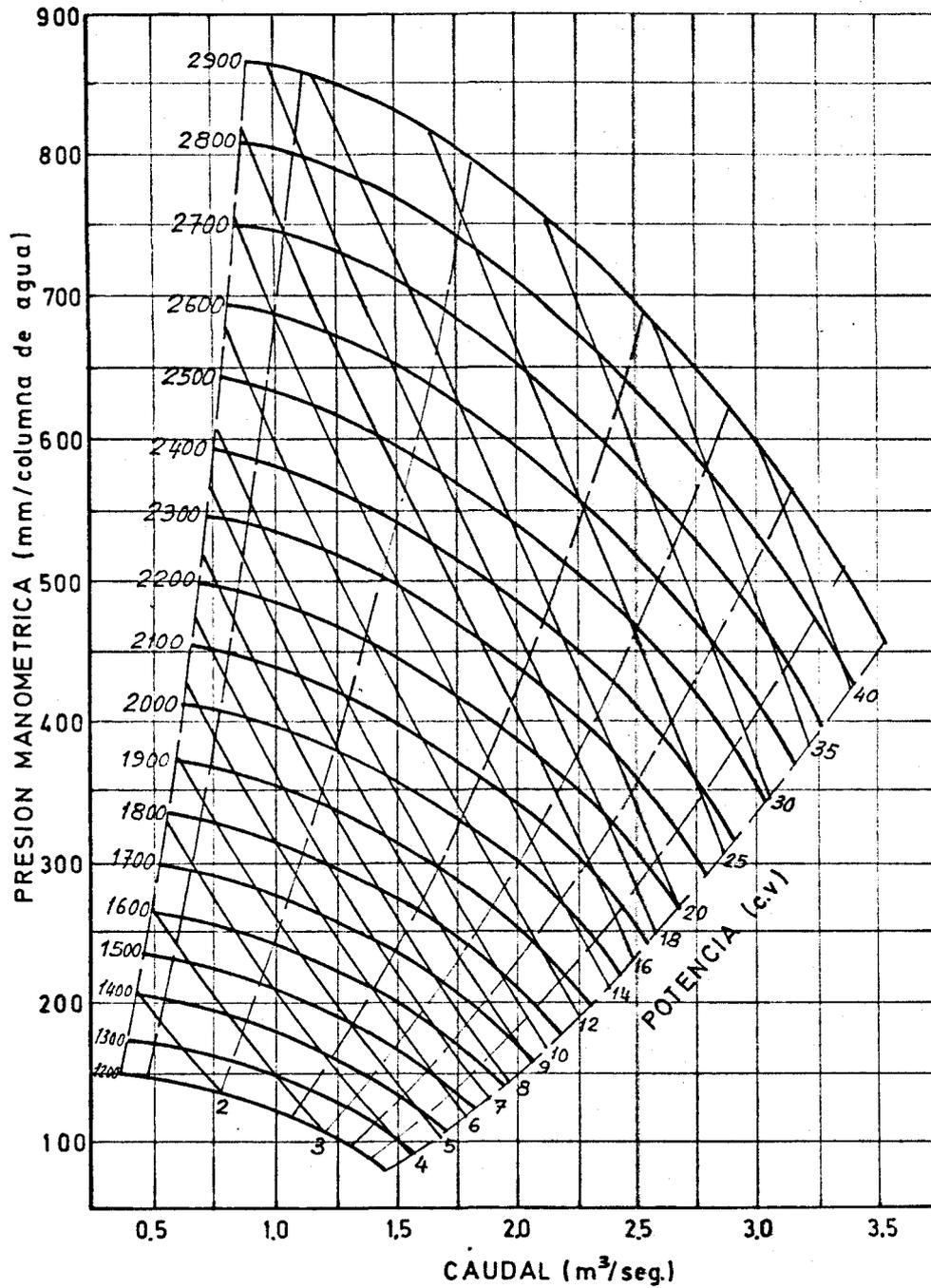


FIG.4-6

COMPRESOR CENTRIFUGO

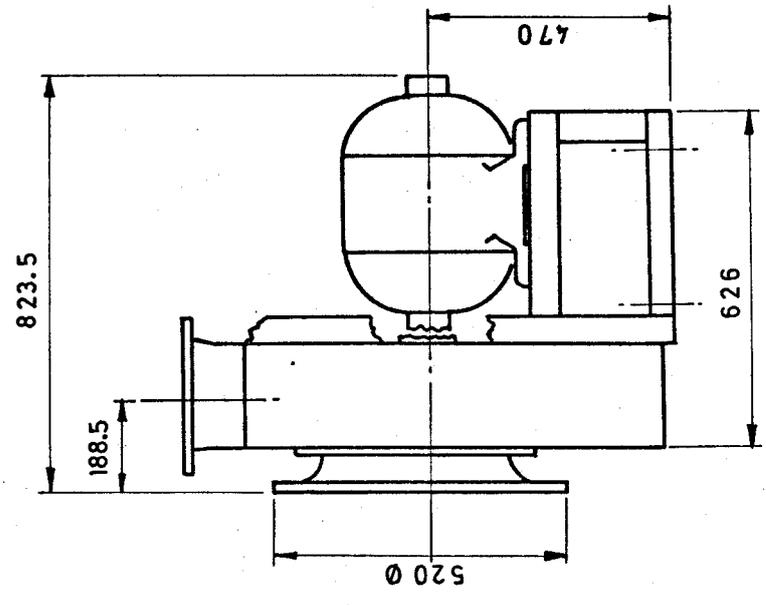
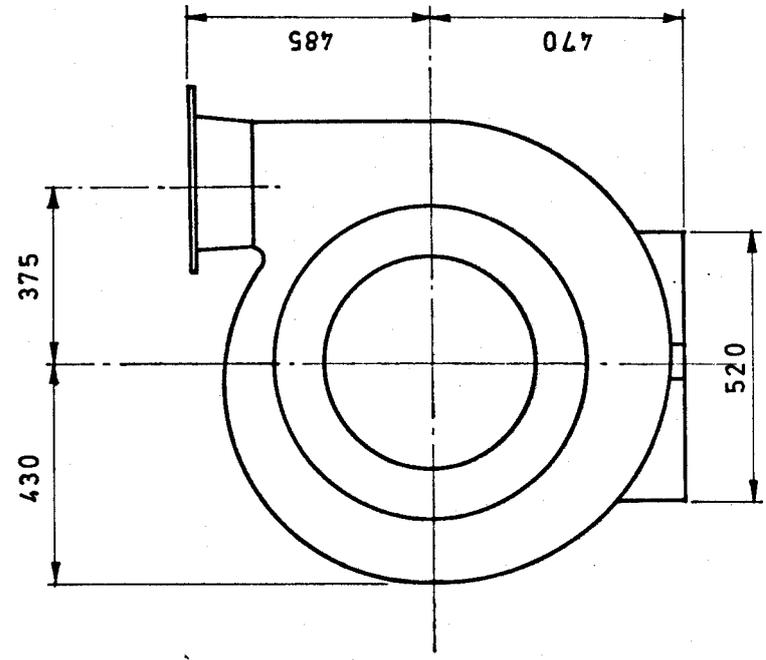


FIG.4-7

to como conveniente la instalación que se representa en el esquema de la Fig. núm. 4-8.

Para la medida del gasto de aire, se emplea una tobera calibrada (1).

El sistema de estrangulación (2) empleado para variar los gastos es una persiana, formada por láminas de madera con perfil aerodinámico. La forma de apertura es tal que el perfil de una lámina y su adyacente quedan simétricos, de manera que la corriente queda perturbada lo menos posible y se reducen las pérdidas de presión; esto se logra accionando las láminas mediante un tren de engranajes.

Las perturbaciones, que en cualquier caso, ocasionaría el sistema estrangulador, son amortiguadas mediante el enderezador (3), dispuesto a continuación y constituido por un retículo de láminas entrelazadas.

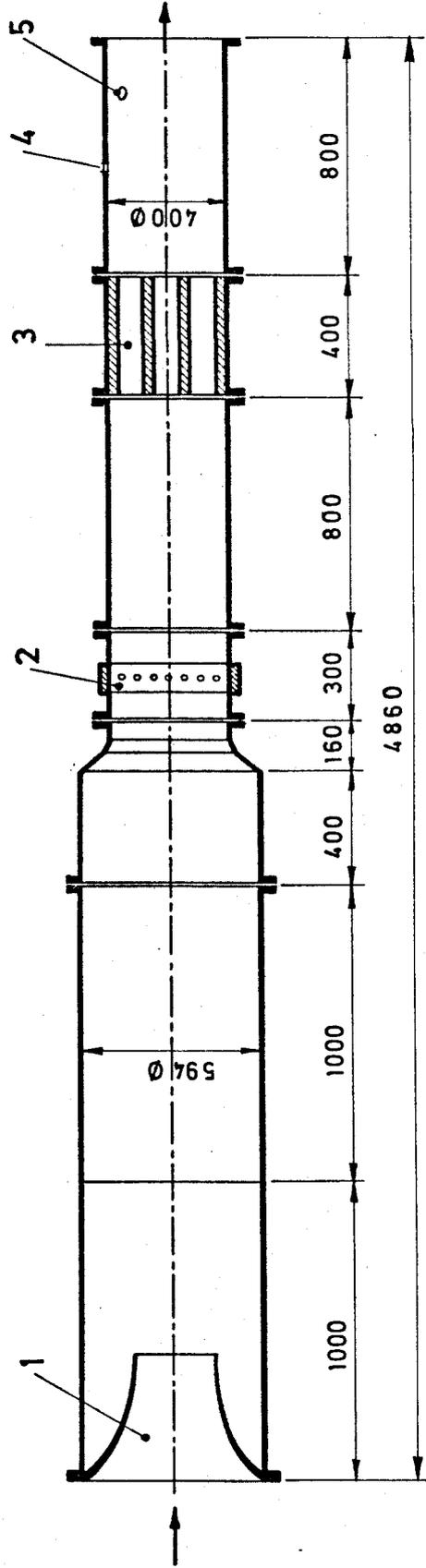
Para la medida de la presión estática, en la sección de entrada del ventilador, se han dispuesto cuatro orificios separados 90° y conectados entre sí, según indican las normas. Igualmente se dispone de dos tomas para la medida de la temperatura, dispuestas circunferencialmente y separadas 90° .

4.2.1.3 Instalaciones de salida del ventilador

La instalación de salida se muestra en el esquema de la

INSTALACION DE ENTRADA AL COMPRESOR

1. TOBERA CALIBRADA
2. SISTEMA ESTRANGULADOR
3. ENDEREZADOR
4. ORIFICIO PARA TOMA DE PRESION ESTATICA
5. ORIFICIO PARA TOMA DE TEMPERATURA



ESCALA 1:20

FIG. 4-8

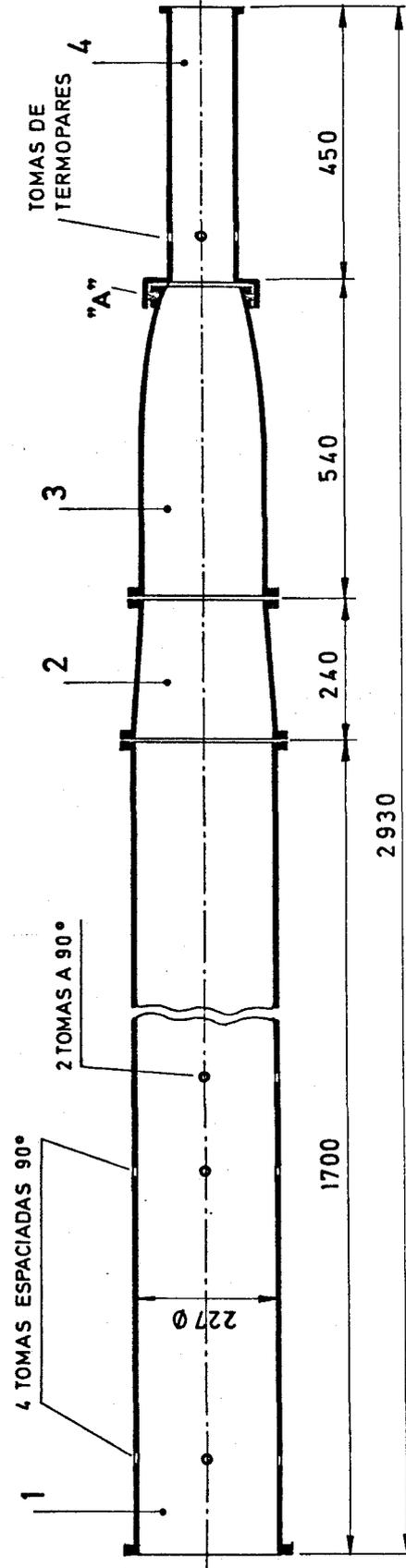
figura núm. 4-9. Está constituida básicamente por un conducto (1), donde se realizan las medidas de temperatura, presión estática y presión dinámica según indican las normas y a las distancias de la sección de salida que se detallan en el esquema; un elemento de conexión a la cámara de combustión (2), cámara de combustión (3) y tubo de descarga (4).

La cámara de combustión es de Nimonic 80-A y puede soportar temperaturas hasta 1273°K . El gasto volumétrico nominal de funcionamiento de esta cámara en nuestros ensayos es igual al que le correspondería en su motor a nivel del mar y en régimen de despegue; gasto que se ha estimado en $0.667 \text{ m}^3/\text{seg}$.

El tubo de descarga, de acero refractario, lleva incorporado una corona de cuatro termopares de "Cromel-Alumel", separados 90° en sentido circunferencial y con su extremo sensible situado en distintos radios. Esta disposición junto con el sistema de acoplamiento a la cámara, en el que se logra la estanqueidad mediante dos segmentos y que permite un giro relativo (véase detalle del acoplamiento), permite obtener la distribución de temperaturas tanto radial como circunferencialmente. (Figs. 4-10 y 4-11).

INSTALACION DE SALIDA DEL COMPRESOR

DETALLE DE ACOPLAMIENTO "A"



ESCALA 1:10

FIG.4-9

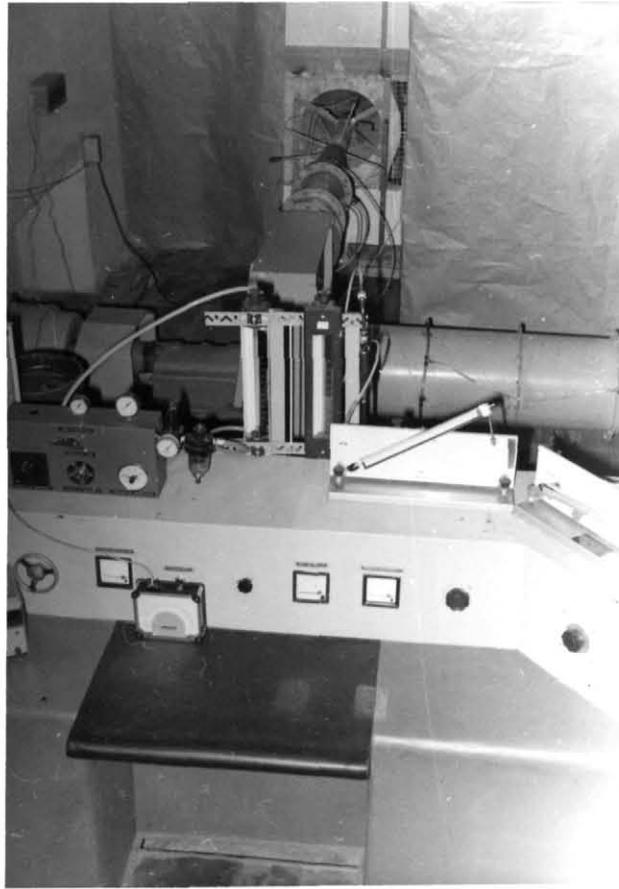


FIG. 4-10.- FOTOGRAFIA GENERAL DE LA INSTALACION.
ES VISIBLE EN ELLA LA CAMARA DE COMBUSTION, CON SU
CORONA DE TERMOPARES PARA LA MEDICION DE LA DISTRI-
BUCION CIRCUNFERENCIAL Y RADIAL DE TEMPERATURAS.



FIG. 4-11.- VISTA DEL PUPITRE DE MANDOS
MOSTRANDOSE LOS EQUIPOS DE MEDICION DE CAUDALES
DE COMBUSTIBLE Y AIRE, TEMPERATURAS, PRESIONES
Y OXIDOS DE NITROGENO.

4.2.2 Sistema de alimentación de combustible

El sistema de alimentación de combustible, se diseñó con el objetivo de conseguir gastos sin pulsaciones para evitar en lo posible los errores en la medida de la riqueza de la mezcla aire/combustible y sus efectos perjudiciales.

Dado que uno de los objetivos de interés en la experimentación, consiste en estudiar la influencia de la inyección en gotas o en fase gaseosa sobre la formación y nivel de emisión de contaminantes, se han construido dos sistemas de alimentación que permiten la inyección de gasolina en gotas, isooctano vaporizado y butano comercial tal como se describen a continuación.

a) Sistema de alimentación de gasolina e isooctano vaporizado.

Un esquema del sistema utilizado se representa en la Fig. 4.12a. Como puede apreciarse resulta sencillo y de gran facilidad de manejo.

Mediante una botella de aire comprimido (1) se presuriza el depósito de combustible (4), siendo posible variar la presión con el manorreductor regulador (2) y válvula de sangrado (3). Las válvulas (5) y (7) son válvulas de cierre y regulación del gasto respectivamente. La lectura del gasto de combustible se efectúa mediante un "flow-meter" (8). La llave de dos vías (9) permite el flujo directo al inyector (12) cuando

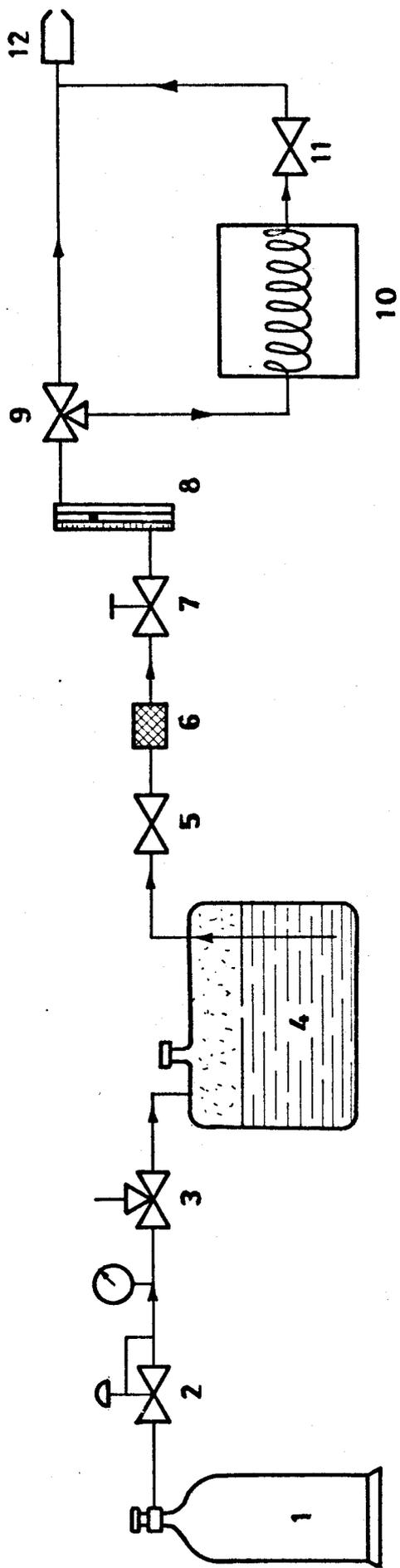


FIG. 4-12 a

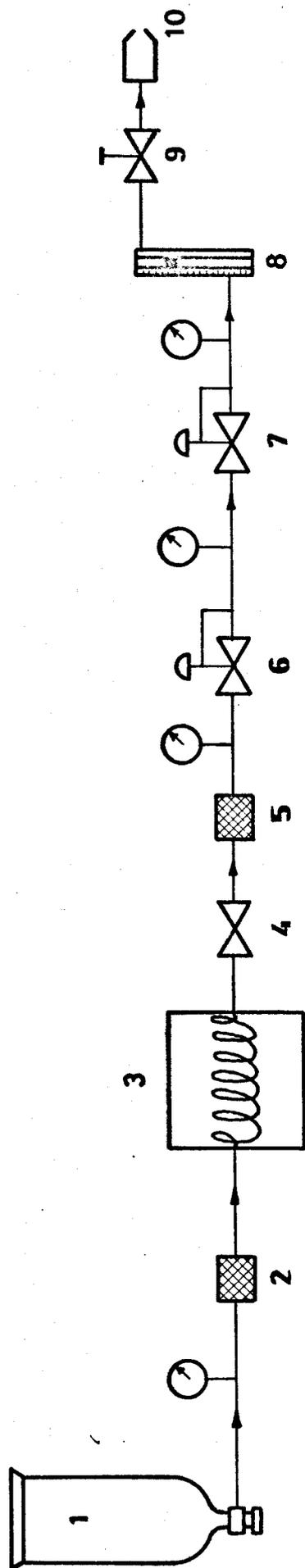


FIG. 4-12 b

se inyecta en fase líquida, o bien a través del vaporizador (10) y llave de cierre (11) cuando se inyecta en fase gaseosa.

El inyector utilizado para inyección en fase líquida corresponde al tipo conocido como "swirl-chamber" de un solo orificio; mientras que el utilizado para isooctano vaporizado es de orificios múltiples. Ambos están contruídos en el laboratorio y pueden verse en la fotografía núm. 4-13 a) y b).

Debe mencionarse que durante la inyección de isooctano vaporizado aparecían oscilaciones del flujo, de baja frecuencia, en determinados rangos del gasto, debido al acoplamiento de las oscilaciones de presión producidas en el vaporizador con las oscilaciones de gasto del sistema de alimentación.

La eliminación de dichas oscilaciones se consiguió aumentando la presión del depósito de combustible e incorporando una resistencia hidráulica en la conducción para mantener la presión de alimentación al inyector.

b) Sistema de alimentación de butano comercial en fase gaseosa.

El sistema de alimentación de butano comercial en fase gaseosa, se presenta en el esquema de la Fig núm. 4-12b. El butano procedente de una botella comercial invertida (1), fluye en fase líquida a través del filtro (2) al vaporizador (3). Ya en fase gaseosa el combustible pasa al "flow-meter" (8) a través de una llave de corte (4) y filtro (5). La presión de

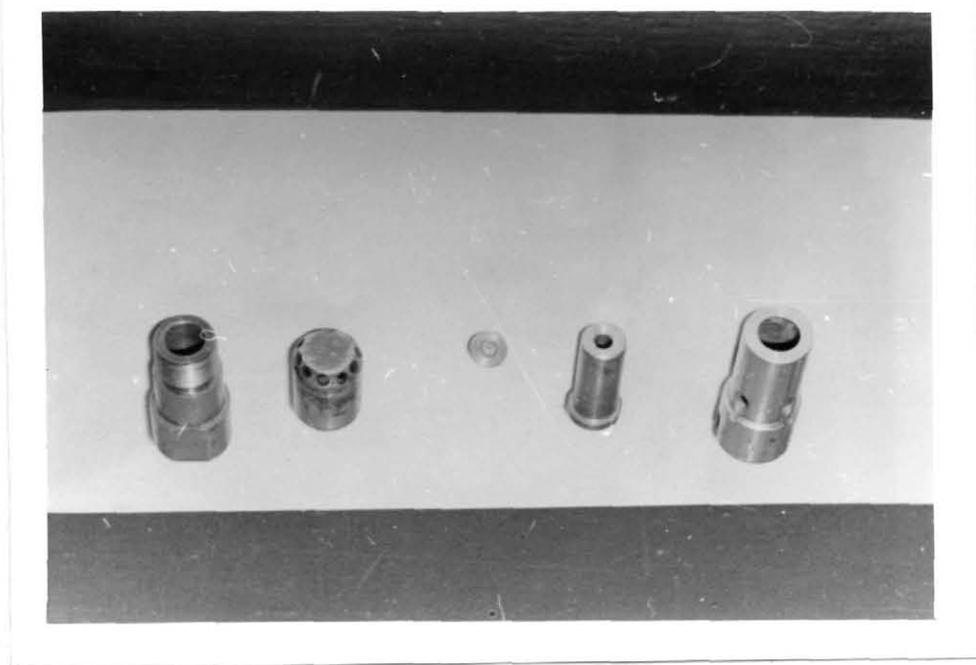
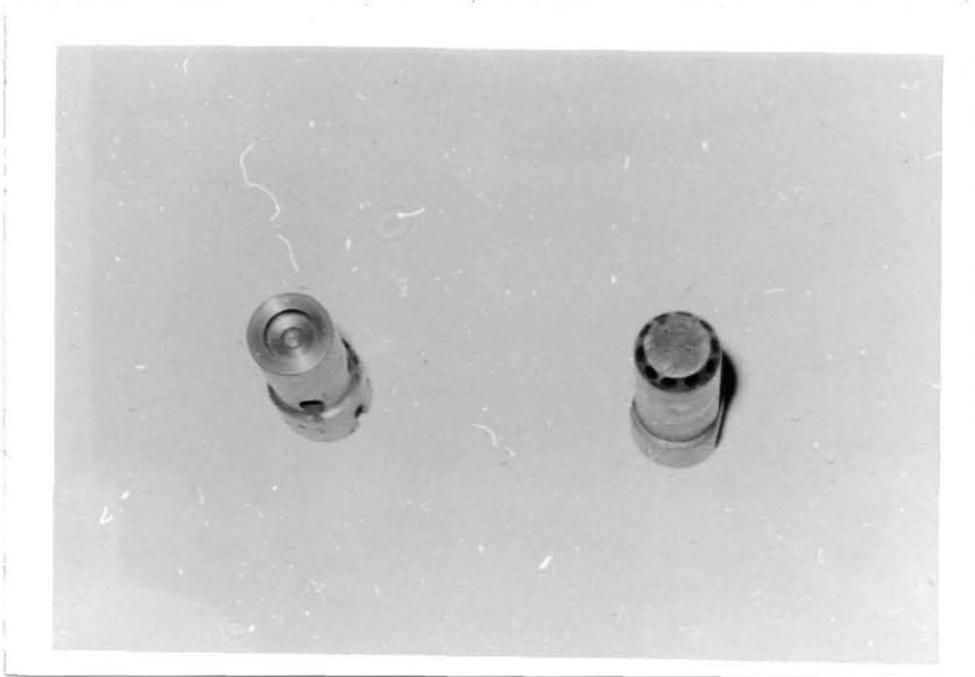


FIG. 4-13 a) y FIG. 4-13 b)

INYECTORES PARA COMBUSTIBLES LIQUIDOS Y VAPORIZADOS.

entrada al "flow-meter" (8), se mantiene constante y sin oscilaciones mediante los reguladores (6) y (7). El caudal suministrado al inyector (10) se controla con la válvula de regulación de flujo (9).

Esta disposición se considera la más idónea por cuanto si se alimentase el combustible directamente, en fase gaseosa, sería necesario instalar una batería de 10 a 12 botellas para obtener los caudales normales de trabajo. El inyector utilizado en este sistema es el mismo que el descrito previamente y utilizado en la inyección de isooctano vaporizado.

4.2.3 Medida del gasto de aire

La medida del gasto de aire, se realiza con la tobera instalada en la instalación de entrada del ventilador.

Esta tobera, fabricada en el Laboratorio con poliéster y fibra de vidrio, corresponde en forma y dimensiones a la tobera comercial calibrada COX-10A. (Fig.4-14).

De acuerdo con las normas DIN, para medida del gasto de aire se tiene,

$$Q_t = 0.01252 \alpha_t \epsilon_t d^2 t \sqrt{\frac{\Delta p_t}{\rho_t}} \quad (4-1)$$

donde:

Q_t = gasto volumétrico a través de la tobera (m^3 /hora)

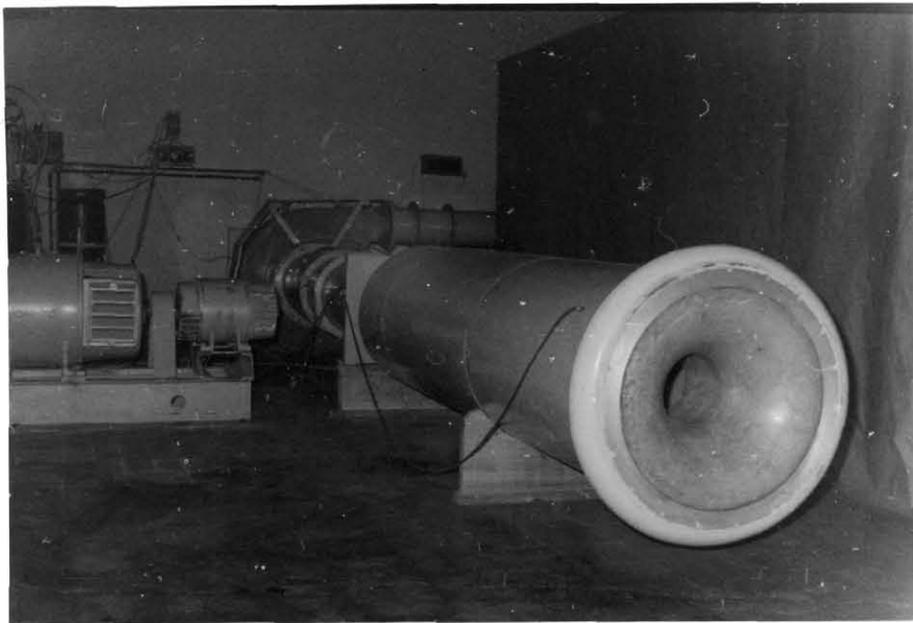


FIG. 4-14.- TOBERA CALIBRADA

TAMBIEN SE MUESTRAN EL COMPRESOR Y GRUPO MOTOR
DEL C.C. PARA REGULACION DEL REGIMEN.

- α_t = coeficiente de gasto de la tobera
 ϵ_t = coeficiente de expansión
 d_t = diámetro de la garganta de la tobera
 ρ_t = densidad a la entrada (Kg/m^3)
 Δp_t = diferencia de presiones estáticas entre las secciones anterior y posterior de la tobera (mm de H_2O).

Las normas DIN proporcionan un valor de $\alpha_t = 0,99$, con una tolerancia del 1%, por encima del límite de constancia; es decir, para Números de Reynolds $\geq 5,5 \times 10^4$, lo que equivale en nuestro caso a un caudal mínimo de $0,112 \text{ m}^3/\text{seg}$. en condiciones standard.

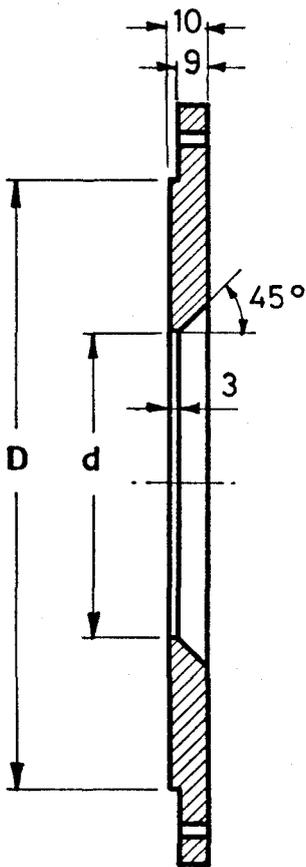
No obstante hay que señalar que, por dificultades de instalación, el borde de la tobera queda a una distancia de 10 cm del suelo; no cumpliendo, por tanto, los requisitos de las normas que exigen la ausencia de obstáculos a una distancia del eje de $10 d_t$ como mínimo.

Este defecto de instalación repercute en el valor de α_t , valor que debe ser obtenido experimentalmente.

La operación de calibrado de la tobera se ha resuelto mediante dos métodos:

- a) Diafragma calibrado (Fig. 4-15).
- b) Exploración de la corriente mediante una sonda de presión total.

DIAFRAGMAS CALIBRADOS



Cotas en mm

Diafragma n° 1

$D = 227.6$ mm. (diámetro del tubo)

$d = 136$ mm.

$m = 0.357$

$\alpha_d = 0.647$

Re mínimo = 1.42×10^5

G mínimo = 0.4608 Kg/sg.

Diafragma n° 2

$D = 227.6$ mm.

$d = 76$ mm.

$m = 0.111$

$\alpha_d = 0.603$

Re mínimo = 3×10^4

G mínimo = 0.0973 Kg/sg.

FIG. 4-15

4.2.3.1 Calibrado de la tobera mediante un diafragma

La expresión del gasto a través de un diafragma calibrado es:

$$Q_d = 0,01252 \alpha_d \epsilon_d d_d^2 \sqrt{\frac{\Delta_{pd}}{\rho_d}} \quad (4-2)$$

donde las variables que interviene, tienen el mismo significado que en el caso de la tobera y con las mismas dimensiones, salvo que el subíndice d significa variables referidas al diafragma.

En el supuesto de que instalemos un diafragma calibrado en nuestra instalación de salida debe cumplirse por continuidad,

$$\rho_t Q_t = Q_d \rho_d \quad (4-3)$$

es decir, teniendo en cuenta las expresiones (4.1) y (4.2) se obtiene:

$$\alpha_t = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_T} \alpha_d \frac{d_d^2}{d_t^2} \sqrt{\frac{\Delta_{pd}}{\Delta_{pt}} \frac{\rho_d}{\rho_t}} \quad (4-4)$$

La idea esencial es, por tanto, diseñar un diafragma calibrado e instalado según las normas, de forma que se conozca con exactitud el valor de α_d . Habida cuenta de que $\epsilon = f(\Delta_p)$ es conocido y que tanto Δ_{pd} como Δ_{pt} pueden determinarse experimentalmente, para distintos márgenes de funcionamiento o gastos, podrá deducirse el valor real de α_t , en el caso que nos

ocupa, mediante la expresión (4-4).

El parámetro de diseño más importante es la relación $m = \left(\frac{d_d}{D}\right)^2$, siendo D el diámetro de la conducción donde se instala el diafragma, ya que tanto el coeficiente de gasto como el número de Reynolds de constancia y en tramos de tuberías antes y después del diafragma, necesarios para una instalación correcta, son función del mismo.

Para nuestro diafragma hemos adoptado un valor $m = 0.357$ (diafragma núm.1, Fig.4-15) obtenido a partir de unos estudios previos, teniendo en cuenta que las normas nos aseguran las tolerancias exactas de los coeficientes de expansión para valores $m > 0,4$ (además de que en este caso los tramos libres de perturbación son exageradamente grandes) y que para valores de m más pequeños serían necesarios unos Δ_{pd} superiores a los que proporciona el ventilador en los márgenes de gastos apropiados para el tarado de la tobera.

En la siguiente tabla se muestran algunos datos que contribuyen a la elección de m . En la cual los valores de ϵ_d , Δ_{pd} y δ_p (pérdidas de presión de remanso) corresponden al gasto nominal $Q = 0,667 \text{ m}^3/\text{seg}$.

T A B L A 4-6

m	α_d	ϵ_d	Re_{min}	Δ_p (mm.H ₂ O)	δ_p (mm.H ₂ O)
0,20	0,615	0,975	$6,9 \times 10^4$	1120	896
0,25	0,624	0,982	$9,0 \times 10^4$	687	515
0,30	0,634	0,987	$1,3 \times 10^5$	457	320
0,35	0,645	0,990	$1,5 \times 10^5$	322	210
0,40	0,66	0,994	$2,0 \times 10^5$	234	140

Los valores experimentales, con los valores de α_t deducidos se reflejan en la Tabla 4-7

T A B L A 4-7

$p_a = 709$ mm de Hg.; $T_0 = 296^\circ K$

Δ_{pt} (mm.H ₂ O)	Δ_{pd} (mm.H ₂ O)	ϵ_d/ϵ_t	α_t
15	104	0,9977	0,988
20	136	0,9669	0,987
25	170	0,9662	0,987
30	206	0,9954	0,992
35	237	0,9946	0,986
40	274	0,9938	0,990
45	308	0,9927	0,990
50	340	0,9922	0,987
60	410	0,9906	0,989
65	443	0,9898	0,988
70	480	0,9889	0,991
82	564	0,9871	0,992

El valor medio deducido corresponde a $\alpha_t = 0,9889$.

Para prever la posible utilización de gastos inferiores

al correspondiente al Reynolds mínimo de constancia, del diafragma calibrado, e incluso inferiores a los del límite de constancia de la tobera, se diseñó un segundo diafragma cuyos datos constructivos y operacionales se presentan en la Fig.4-15(2°) El valor de α_t obtenidos en este caso para gastos comprendidos entre 0.097 Kg/seg y 0,47 Kg/seg no difiere del anterior.

4.2.3.2 Exploración de la corriente mediante una sonda.

Si se instala una sonda de presión total en la sección de salida de la conducción de medidas, es decir, sin cámara de combustión ni demás elementos, puede obtenerse el perfil de velocidades de la corriente al desplazar la sonda radialmente.

En nuestro estudio el número de Mach de la corriente a la salida es del orden de 0,08, de forma que puede suponerse que el fluido es incompresible, obteniéndose en consecuencia:

$$V_s = 2 \frac{P_R - P_a}{\rho} \quad (4-5)$$

donde

V_s = velocidad de salida

ρ = densidad del gas

P_R = presión de remanso

P_a = presión ambiente

El método resulta ser de gran eficacia toda vez que la medida de presión total es precisa y la presión ambiente es conocida.

En la Tabla 4-8, se dan los valores de $p_R - p_a$ para un Δ_{pt} de 84 mm de columna de agua y los valores de V_s deducidos, cuyo perfil es el de la Fig. núm. 4-16.

De la expresión (4-1) se deduce

$$\alpha_t = \frac{Q \times \sqrt{\rho}}{\epsilon_t \times 0,01252 \times \sqrt{\Delta_{pT}} \times d_t^2} \quad (4-6)$$

De forma que el coeficiente de gasto α_t puede conocerse, siempre que se conozca el gasto correspondiente a un determinado Δ_{pt} .

El valor del gasto, como es obvio, se obtiene del perfil de velocidades mediante una integración gráfica, ya que

$$Q = 2\pi\rho \int V_s r dr \quad (4-7)$$

Con el método expuesto se ha obtenido $\alpha_t = 0,992$ que difiere en un 0,3% del valor obtenido con el diafragma calibrado; cualquiera de ambos valores es aceptable teniendo en cuenta que, además, las normas proporcionan (en el caso de una instalación correcta) un valor $\alpha_t = 0,99$, con una tolerancia del 1%.

PERFIL DE VELOCIDADES

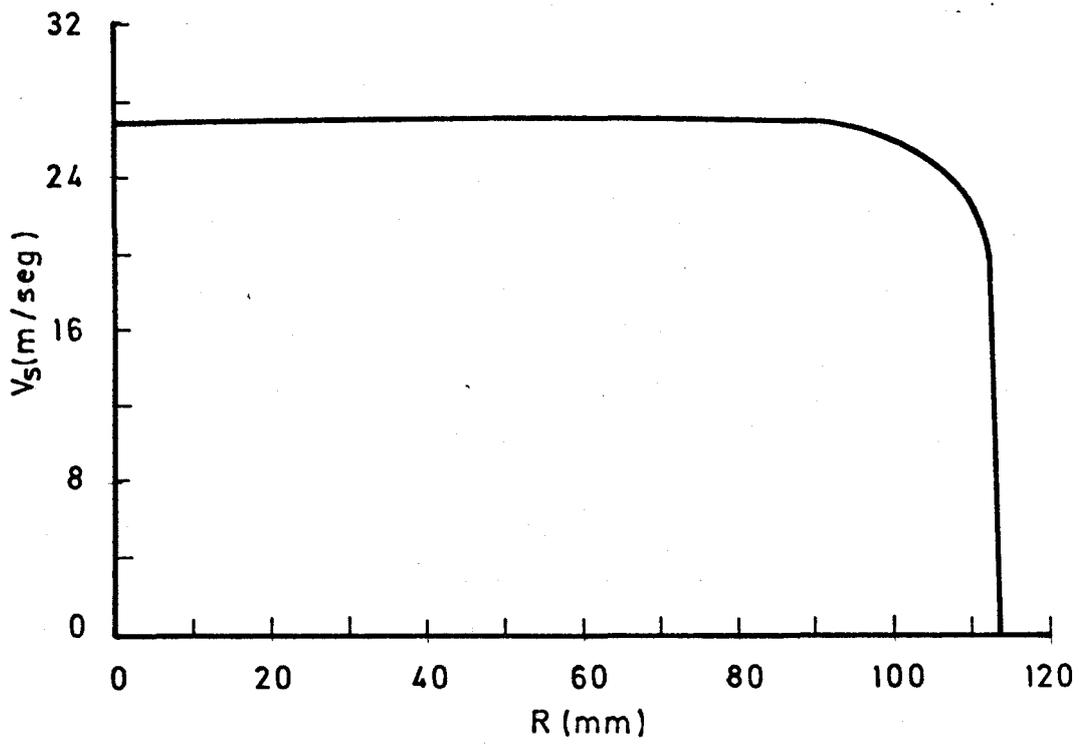


FIG.4-16

T A B L A núm. 4-8
PERFIL DE VELOCIDADES

$\Delta_{pt} = 84 \text{ mm de H}_2\text{O}$; $P_a = 709 \text{ mm de Hg}$; $t_a = 26^\circ$

posición de la sonda (mm)	presión medida $\times \frac{1}{2}$ (mm de H ₂ O)	V_s (m/seg.)
2	12,2	21,39
4	14,2	25,34
6	15,4	24,03
8	16,4	24,81
10	17,1	25,33
12	17,5	25,63
14	18	25,99
16	18,3	26,20
18	18,5	26,35
20	18,6	26,42
25	18,9	26,63
30	18,85	26,60
40	18,85	26,60
50	18,85	26,60
60	18,75	26,53
70	18,7	26,49
80	18,7	26,49
90	18,7	26,49
100	18,7	26,49
110	18,7	26,49
120	18,85	26,60
130	19	26,70
140	19,1	26,77
150	19,1	26,77
160	19,2	26,84
170	19,2	26,84
180	19,2	26,84
190	19	26,70
200	18,2	26,13
210	18,4	26,31
212	18,3	26,20
214	18	25,99
216	17,5	25,63
218	17,1	25,53
220	16,4	24,81
222	15,4	24,03
224	14,2	23,08
226	12,2	21,39

4.2.4 *Medida del gasto de combustible*

La medida del gasto de combustible, tanto en el caso de inyección de gasolina en gotas como de isooctano vaporizado, se realiza en fase líquida mediante un rotámetro para gas-oil (capaz de soportar una presión de 20 Kg/cm²) previamente calibrado para los combustibles anteriormente mencionados. La operación de calibrado se efectuó recogiendo en una probeta el combustible que fluye por el inyector durante dos minutos.

La medida del gasto de butano se realiza en fase gaseosa con un rotámetro para aire. La presión de entrada al rotámetro se mantiene constante y la calibración se efectuó midiendo el tiempo necesario para una variación en peso de la botella de butano de 0,5 Kg.

Las curvas de calibración se presentan en las figuras núms. 4-17, 4-18 y 4-19.

4.2.5 *Análisis de los óxidos de nitrógeno*

Inicialmente la concentración de los óxidos de nitrógeno, en los productos de combustión, se realizaba con el método conocido con el nombre de "fenol-disulfónico".

Este método es el más apropiado cuando los niveles de emisión de este contaminante varía de cinco a varios miles de p.p.m.; habiéndose comprobado, por otra parte, que la presen-

CURVA DE CALIBRADO DEL FLOW-METER PARA GASOLINA

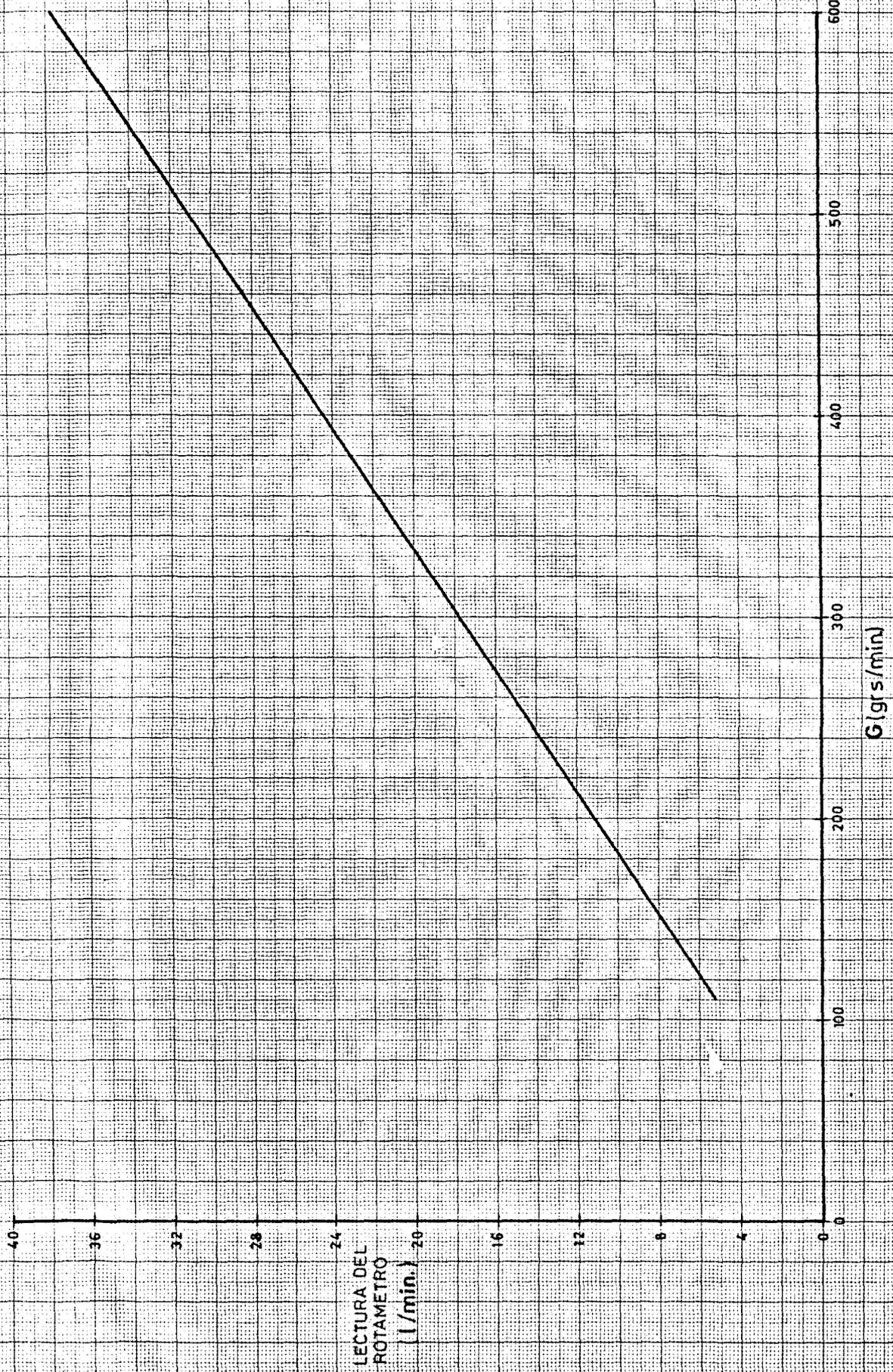


FIG. 4-17

CURVA DE CALIBRADO DEL FLOW-MEETER PARA ISOOCIANO

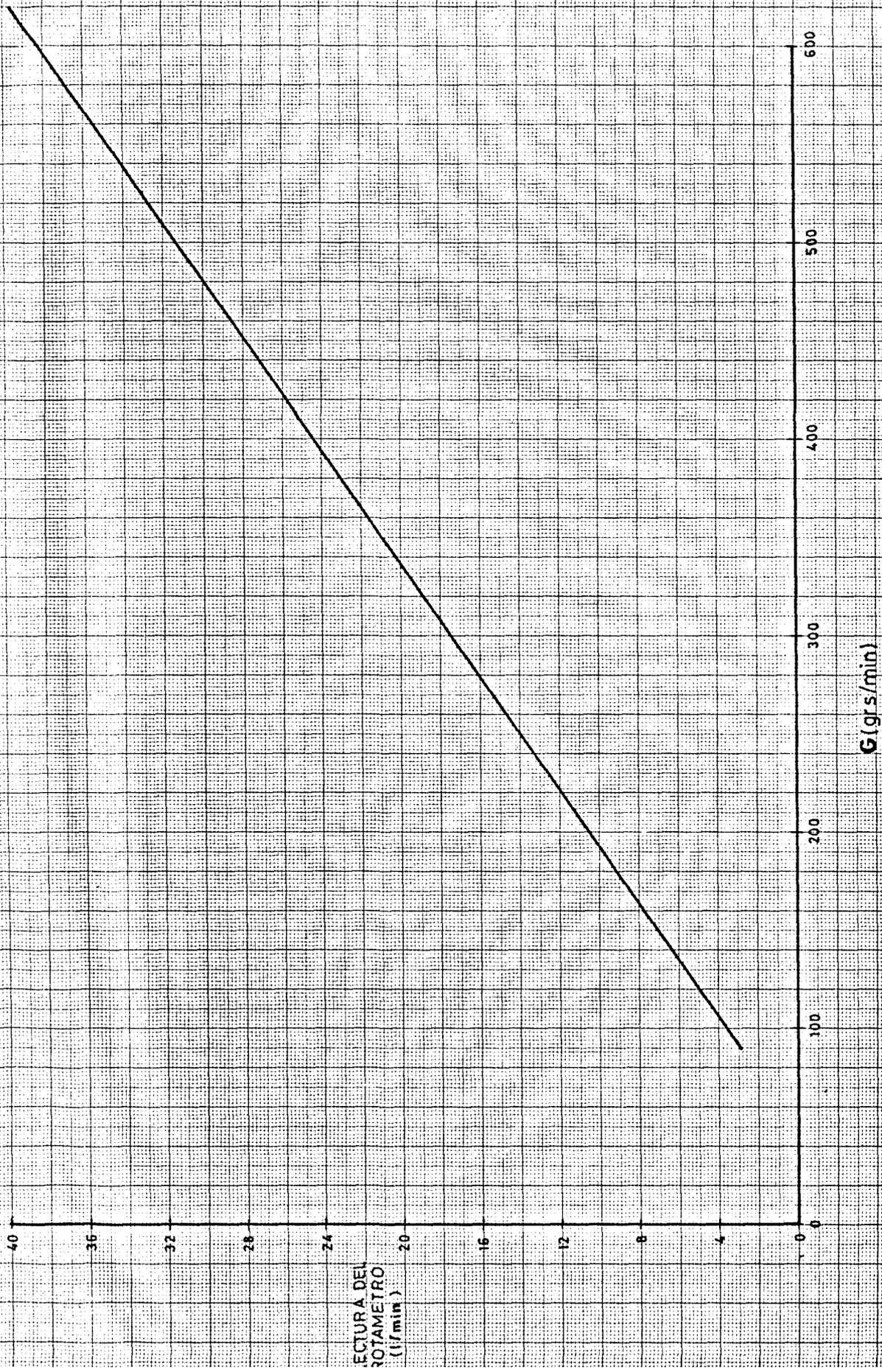


FIG. 4-18

CURVA DE CALIBRACION DEL FLOW-METER PARA BUTANO COMERCIAL

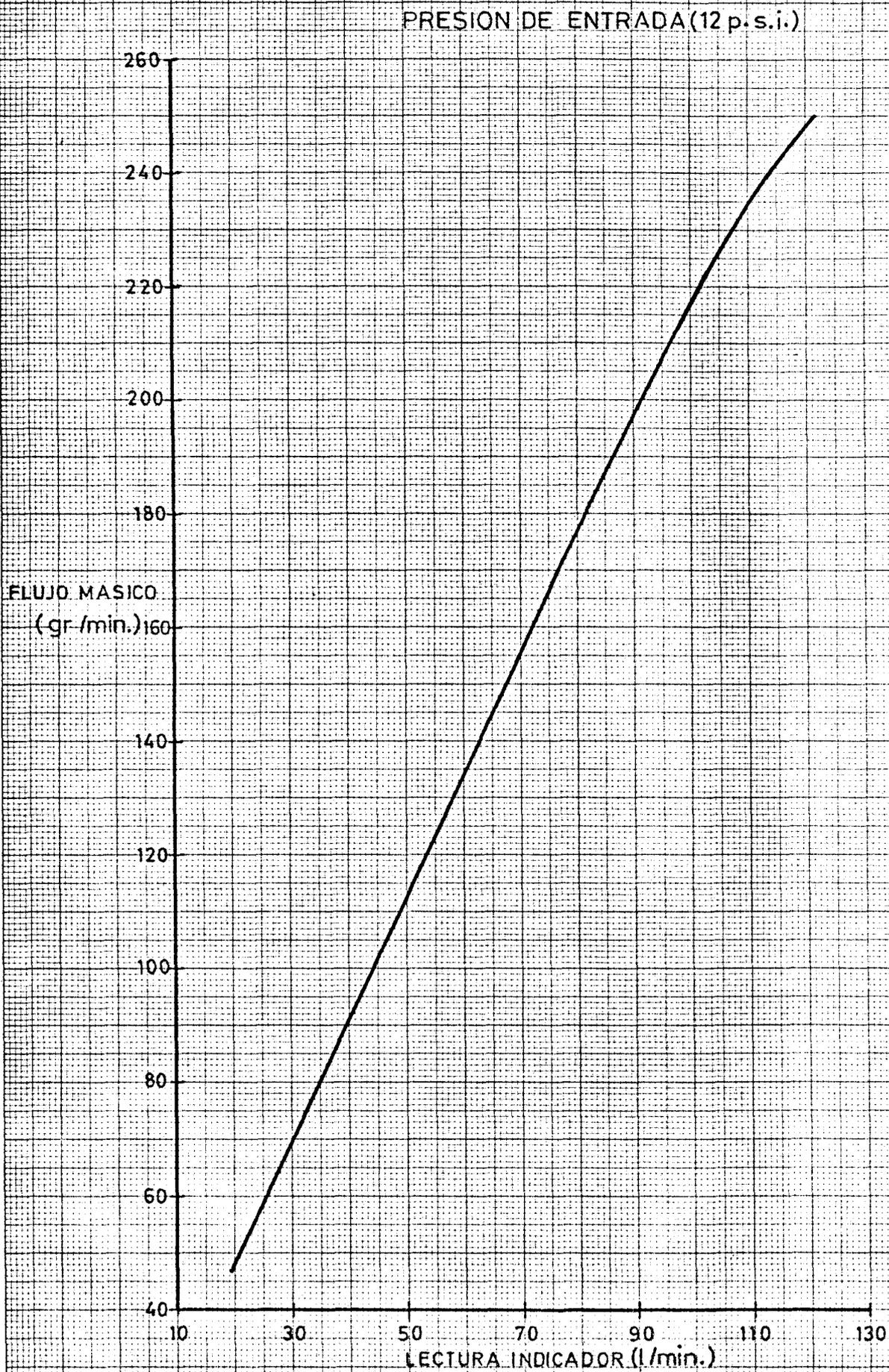


FIG. 4-19

cia de otros contaminantes no falsea ni altera los resultados obtenidos.

Sus inconvenientes principales son la lentitud en el análisis de muestras y sobre todo la medida global de la concentración de los óxidos de nitrógeno (NO_x), ya que este método no proporciona medidas separadas de la concentración del monóxido de nitrógeno y del resto de los óxidos de nitrógeno.

Posteriormente, se adquirió un analizador por quimiluminiscencia Beckman - 957. Este equipo determina la concentración del NO y la de NO_x independientemente, permitiendo, además, un análisis rápido y directo por cuanto la muestra, procedente de los gases de escape, fluye continuamente al analizador aspirada por una bomba.

No obstante, para la calibración del analizador es necesario disponer de mezclas de NO y NO_x con nitrógeno en concentraciones conocidas. Se ha comprobado que dichas concentraciones varían con el tiempo, bien tendiendo al equilibrio o a causa de reacciones en la superficie de los tubos de gases, por lo que es necesario realizar periódicamente un calibrado de dichas botellas patrón. Esta calibración se efectúa con el método del ácido "fenol-disulfónico" por lo que se describe a continuación.

Brevemente el procedimiento es como sigue: la muestra

se recoge conectando a la fuente durante 10 seg. un frasco de dos litros de capacidad, en el que se ha hecho previamente un vacío correspondiente a la presión de vapor de la solución absorbente (formada por una solución diluída de H_2O_2 y SO_4H_2) en cantidad de 25 ml. El H_2O_2 oxida a los óxidos inferiores de nitrógeno a NO_3H ; se evapora la disolución resultante y se tratan los residuos con una disolución de ácido fenol-disulfónico. Mediante una posterior evaporación los residuos son tratados con 5 ml. de NH_4OH concentrado, formándose la sal trialcalina del 6-Nitrofenol-2,4-disulfónico que toma una coloración amarilla; filtrado este producto y disuelto en agua hasta 5 ml se obtiene, mediante un colorímetro su transmitancia o absorben-cia; lo que proporciona la medida de su concentración en p.p.m., previo conocimiento de la curva de calibración, mediante la expresión:

$$\{NO_2\} = \frac{1356 \text{ WAT}}{V_m (p_a + \Delta_p)} \quad (4-8)$$

donde:

- W = miligramos de NO_2 , por 50 ml. de solución final, de la curva de calibración
- A = factor de disolución
- V_m = volumen del frasco de muestra en litros
- p_a y T_a = presión y temperatura ambientes
- Δp = presión diferencial del frasco de muestras con respecto a la presión ambiente.

La curva de calibración, por otra parte, se obtiene experimentalmente teniendo en cuenta que una disolución patrón de 0,5495 gr. de NO_3K en un litro de agua contiene el equivalente de 0,250 mgr. de NO_2 .

Para ello se prepararon un conjunto de recipientes, con muestra patrón, cuyo contenido y la cantidad correspondiente de mgr. de NO_2 se indica en la Tabla núm.4-9.

Después de ser tratadas, en igual forma que la expuesta para una muestra tomada directamente de la cámara, se midió con el calorímetro equipado con un filtro de 449μ los valores de la transmisión o absorción de cada una de las muestras; valores con los cuales se dibuja la curva de la Fig. núm.4-20.

Utilizando la expresión (4-8), se ha obtenido además la concentración en p.p.m. que correspondería a cada una de las muestras patrón en condiciones normales y que pueden verse en la última columna de la Tabla. Con estos valores se representa la curva transmitancia-concentración (p.p.m.), que puede verse en la Fig. núm.4-21. Puede observarse que a partir de unas 150 p.p.m. la variación de transmisión es pequeña, por lo que se cometen grandes errores en esta zona cuando se utilizan muestras cuya concentración supera el valor indicado. En estos casos es aconsejable diluir la muestra dos o tres veces y obtener la media de la concentración resultante.

CURVA DE CALIBRACION

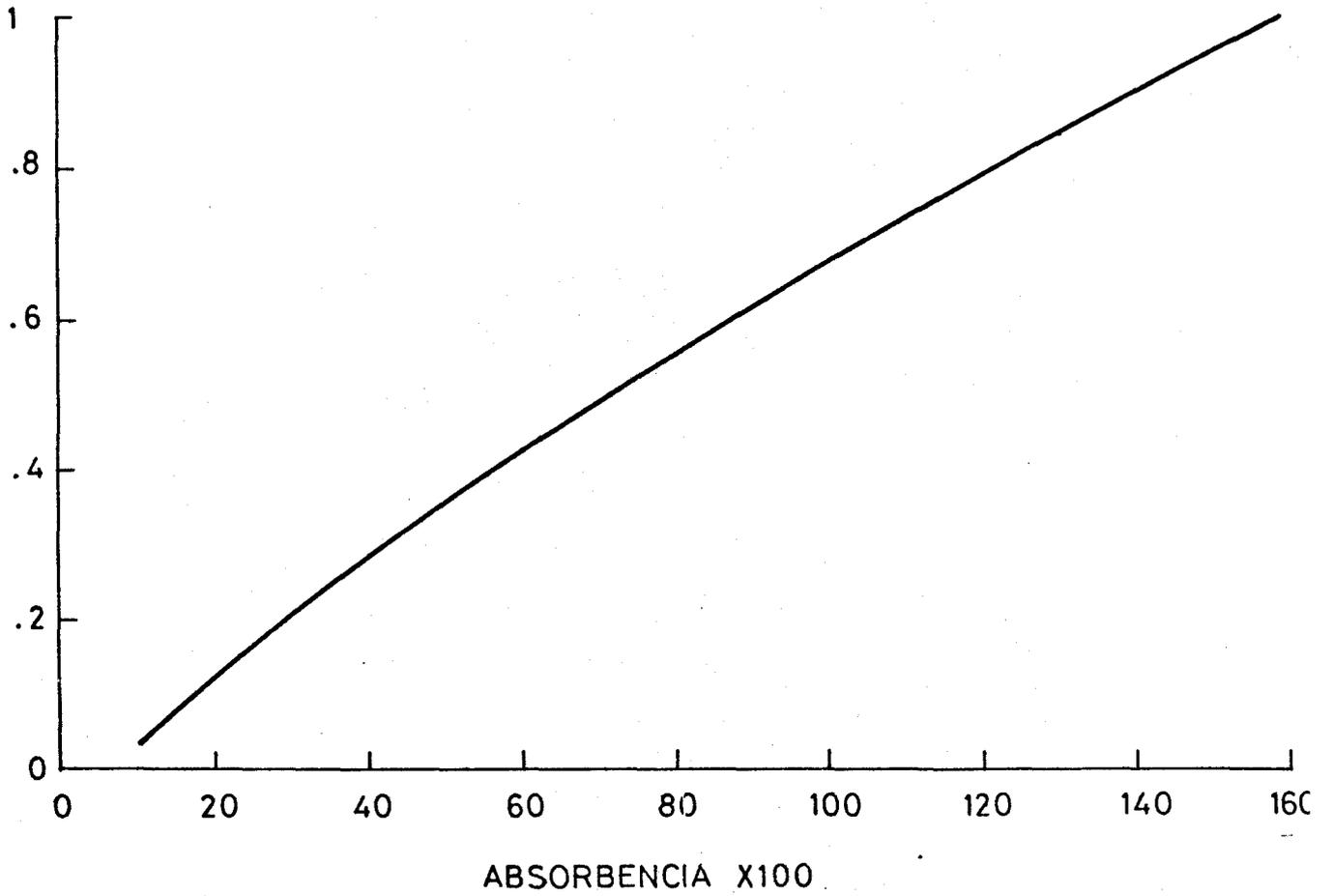


FIG. 4-20

CURVA DE CALIBRADO
(En condiciones normales)

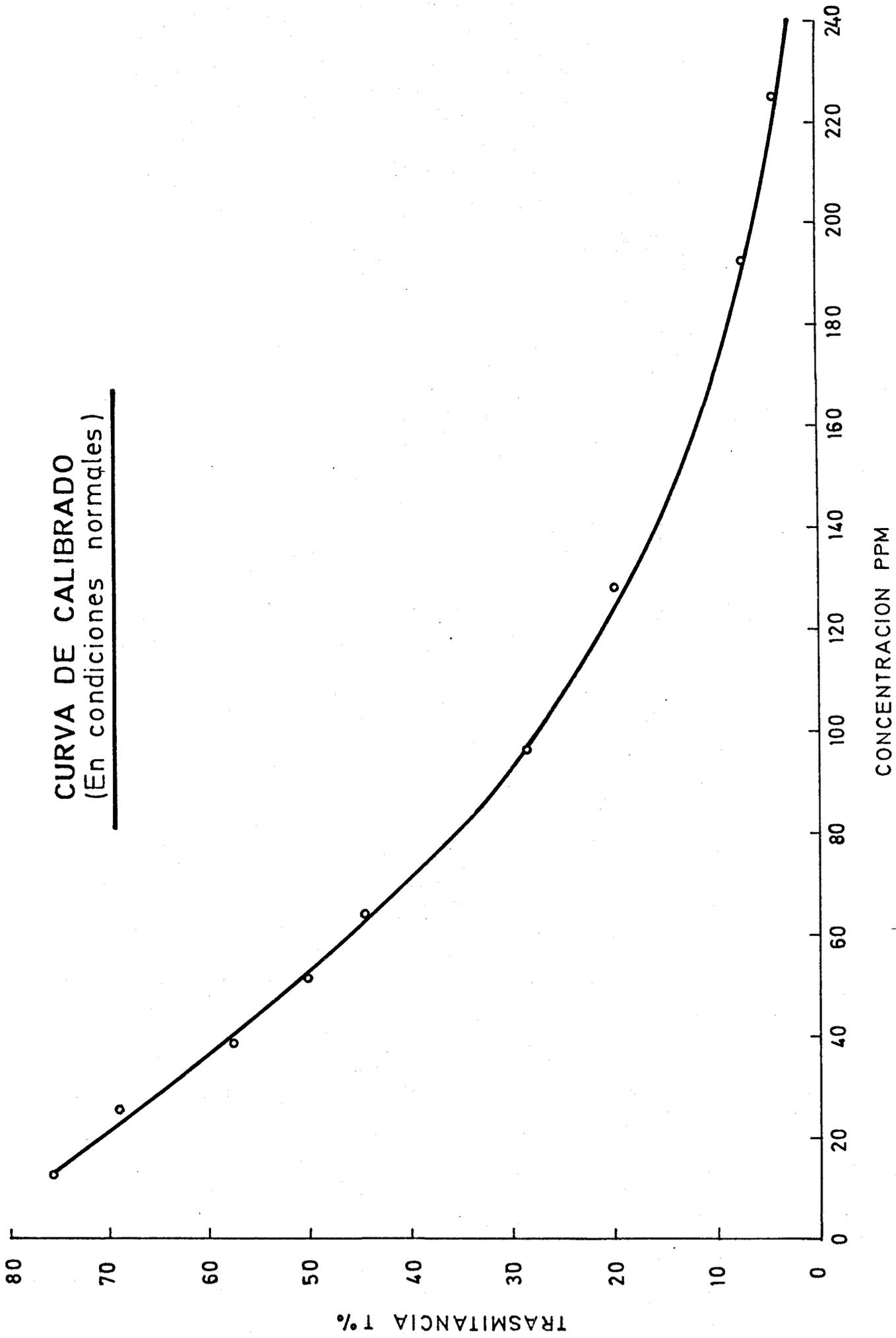


FIG. 4-21

T A B L A núm. 4-9

ml.de NO ₃ K (muestra patrón)	mgr.de NO ₂	T(%) (Transmi- tancia)	A Absorben- cia	p.p.m.
0,2	0,250	73,35	0,123	12,85
0,4	0,1	69	0,161	25,69
0,6	0,150	57	0,244	38,54
0,8	0,2	49,65	0,304	51,38
1	0,25	44,25	0,354	64,23
1,5	0,375	27,8	0,553	96,36
2	0,5	19,8	0,703	128,46
3	0,75	7,2	1,43	192,69
4	1	2,5	1,602	256,92

4.2.6 Cámara de distribución de aire variable

Conocida es la influencia que la riqueza de la zona primaria de la cámara de combustión ejerce sobre la formación de los óxidos de nitrógeno. Aunque las cámaras de combustión convencionales funcionen con relaciones globales aire/combustible, en peso, del orden de 60 a 1, la riqueza de la zona primaria es normalmente próxima a la estequiométrica. En consecuencia, es de interés comprobar la eficacia y cuantía de la reducción de los óxidos de nitrógeno emitidos cuando, funcionando con riquezas globales idénticas, se empobrece la zona primaria; teniendo en cuenta, además, la posible repercusión de este efecto sobre el rendimiento, facilidad de arranque y extinción de

la llama.

Para realizar este estudio es necesario variar en alguna forma la relación aire primario-secundario de una cámara convencional. Esto se ha conseguido mediante la instalación cuyo esquema se presenta en la Fig. núm. 4-22.

Como puede deducirse la variación de la relación aire primario-secundario, se logra mediante la mariposa central (1), y mariposa anular (2), formada por dos chapas perforadas y paralelas de tal modo que la estrangulación de la corriente se consigue mediante un giro relativo.

Esta disposición se consideró lo más adecuada teniendo en cuenta que a pesar de la posibilidad de instalar una mariposa convencional para restringir el flujo secundario, la perturbación introducida por la misma podía originar alteraciones importantes en la corriente.

Con esta instalación se pretendía, además, estudiar la influencia del grado de mezcla sobre la formación y nivel de emisión de los óxidos de nitrógeno. En tal sentido el tubo (3), acoplado a la cámara y por donde circula el aire primario, puede considerarse como un tubo de premezcla si se inyecta el combustible por el extremo más alejado de la cámara. Aunque este experimento de la influencia del grado de mezcla se realizó en la forma descrita, hubo que desistir por cuanto se produjo re-

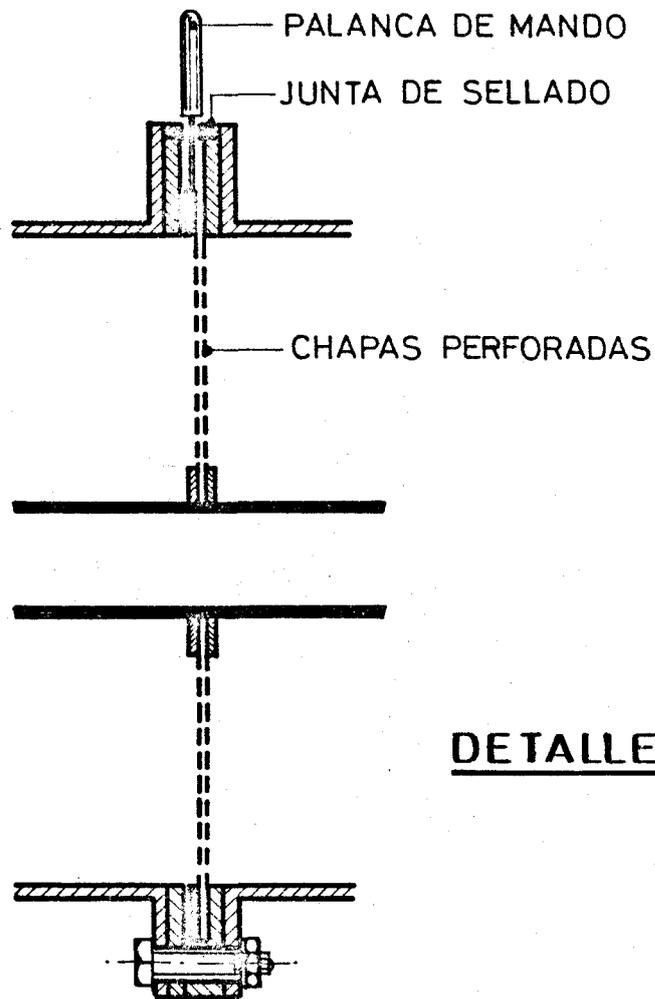
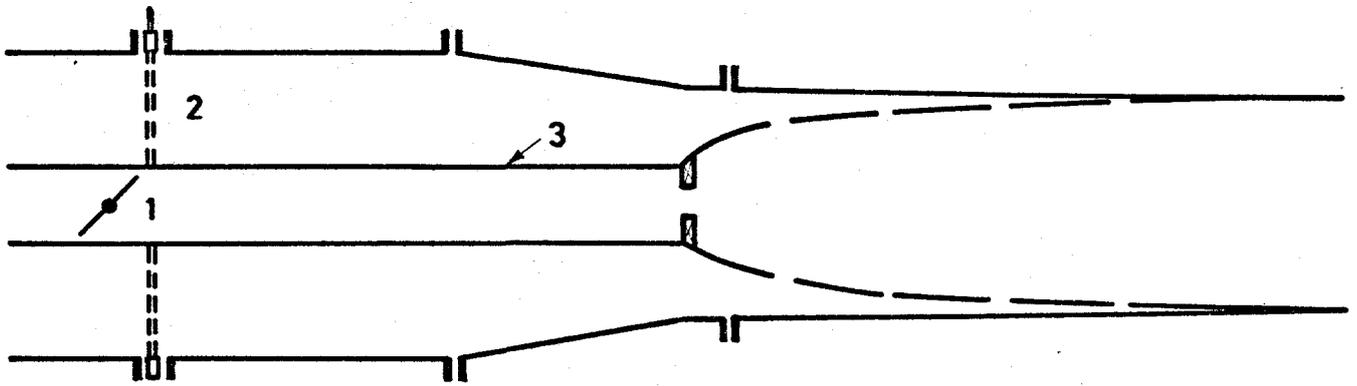


FIG. 4-22

troceso de llama; a pesar de que se colocó una rejilla en la sección del "swirler", en previsión de que ocurriese este fenómeno. Por esta causa, se llegó a la conclusión de que dicho experimento debía llevarse a cabo mediante una cámara especial que actualmente se encuentra en fase de estudio.

T A B L A núm.4-10
ACTUACIONES DE CAMARA DE INYECCION DE
GASOLINA EN GOTAS

$$p_o = 711 \text{ mm.Hg.} ; T_o = 295^\circ\text{K.}$$

$r = 72,96$ (relación global aire/combustible en peso)

Gasto de aire (gr/seg.)	{NO} (p.p.m.)	{NO _x } (p.p.m.)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	T ₃ (°K)	T ₄ (°K)
155	5,8	6,8	623	793	808	833
155	6,3	7,5	643	800	803	833
219	5,5	6	638	803	823	858
219	5,5	7	623	803	803	833
274	5,2	6,3	643	828	848	873
274	5,5	6,8	638	833	833	853
310	5	6,5	623	823	863	883
310	5	6,8	628	833	843	858
347	4,8	6,5	618	858	883	903
347	5	6,8	613	833	873	878
$r = 54,72$						
155	15	19	798	943	978	1028
155	13,5	17	783	933	968	1023
155	13,5	16,5	788	938	973	1023
219	11	16,5	758	973	1048	1098
219	10,5	14,5	758	973	1048	1103
219	11	15,5	763	973	1053	1103
274	10	15,5	743	988	1058	1098
274	9,3	13,3	753	988	1063	1103
274	9,8	14,5	743	983	1063	1103
310	10,2	16	728	993	1093	1118
310	10	14,5	728	993	1103	1123
310	9,5	13,5	733	998	1093	1123
310	10	14,5	-	-	-	-

.

Tabla núm. 4-10(Continuación)

Gasto de aire	{NO}	{NO _x }	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
347	9	14,5	723	983	1113	1123
347	8,5	13,3	723	993	1113	1123
347	8,5	13,5	723	983	1113	1113
		r = 45,60				
155	18,5	20,5	863	1023	1088	1128
155	23,5	25,5	858	1018	1073	1123
155	21	25	878	1023	1073	-
219	20,5	21,5	823	1053	1173	1228
219	21,7	23,5	818	1043	1178	1223
219	20,5	23	843	1043	1163	-
274	20,5	21,3	813	1063	1208	1238
274	20,5	23,5	823	1058	1203	1238
274	20	22,5	828	1063	1203	-
310	19	20,5	828	1053	1198	1223
310	19	21	828	1053	1193	1223
347	19	20	818	1053	1193	1213
347	18,5	20,5	823	1053	1203	1213

4.3 Presentación de resultados

a) Actuaciones de cámara con inyección de gasolina en gotas.

En la Tabla núm.4-10, se presentan las medidas de la concentración de NO y NO_x, así como de las temperaturas de los gases de escape (medidas en la sección y radios indicados en la descripción de la instalación) en función del gasto de aire y para riquezas globales aire/combustible $r = 72,96, 54,72$ y 45,60.

Los resultados de la concentración de NO y NO_x, se representan, además, en los gráficos de las figuras núms.4-23 y 4-24 respectivamente.

b) Actuaciones de la cámara con inyección de isooctano vaporizado.

Estos resultados se presentan en la Tabla núm.4-11 y figura núm.4-25, para las mismas riquezas del caso anterior.

c) Actuaciones de cámara convencional con inyección de butano gaseoso.

El poder calorífico inferior de la gasolina e isooctano es de 10.400 Kcal/Kg., mientras que el del butano comercial es de 10.950 Kcal/Kg.

Para que los resultados obtenidos en este caso sean com

**ACTUACIONES DE CAMARA CON
GASOLINA (INYECCION DE GOTAS)**

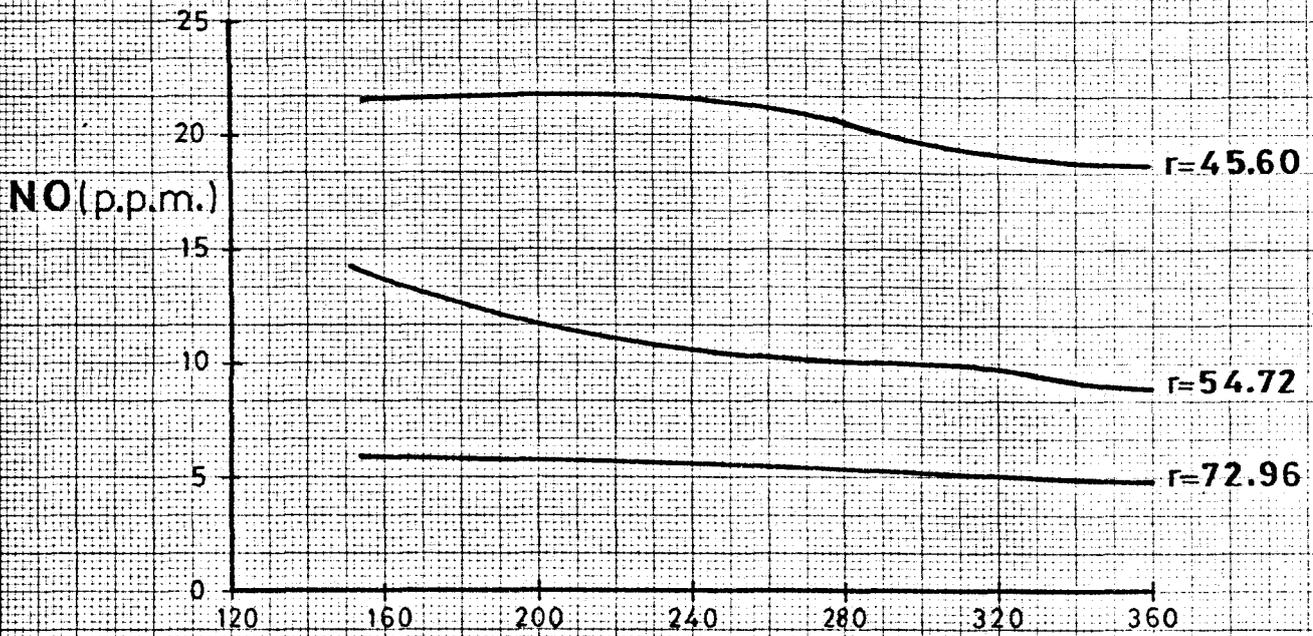


FIG. 4-23

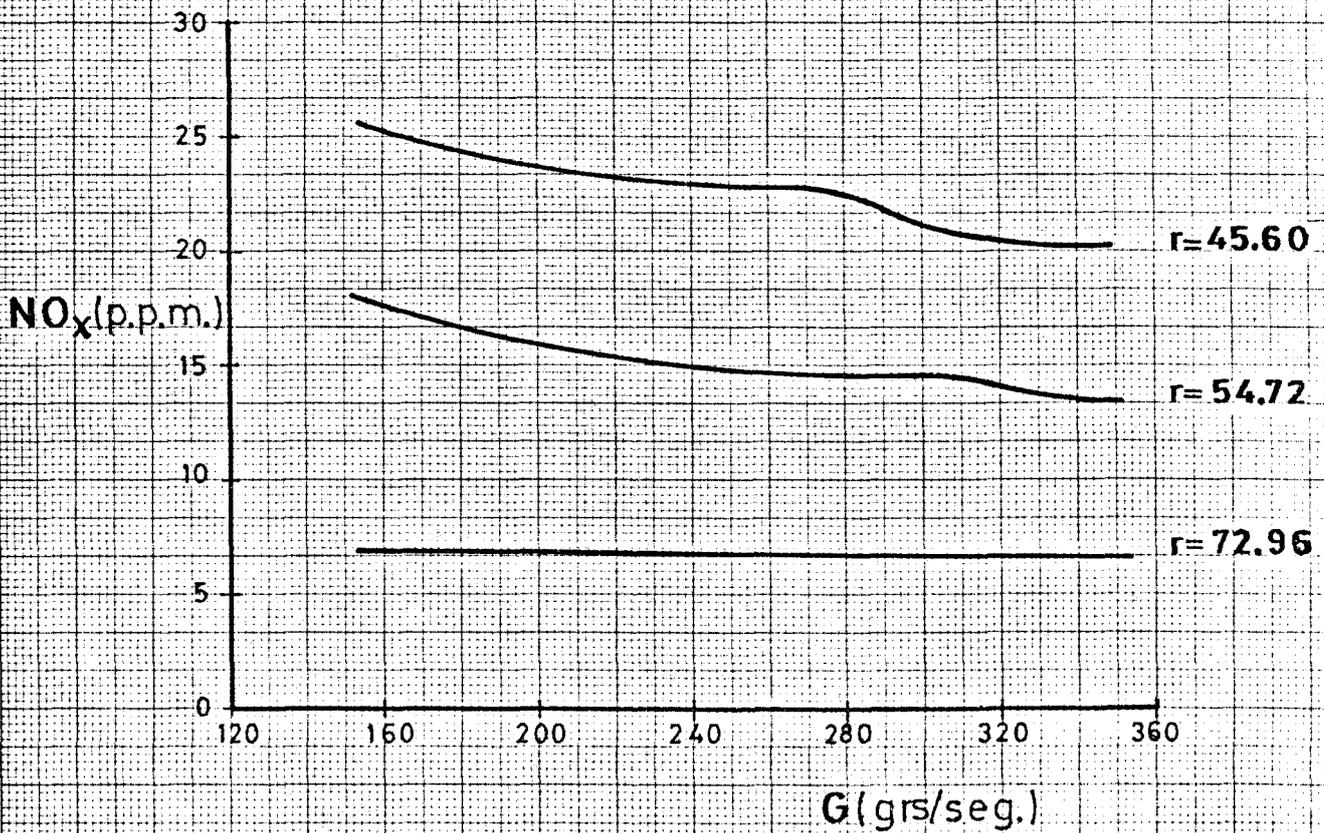


FIG. 4-24

**ACTUACIONES DE CAMARA CON
ISOCTANO VAPORIZADO**

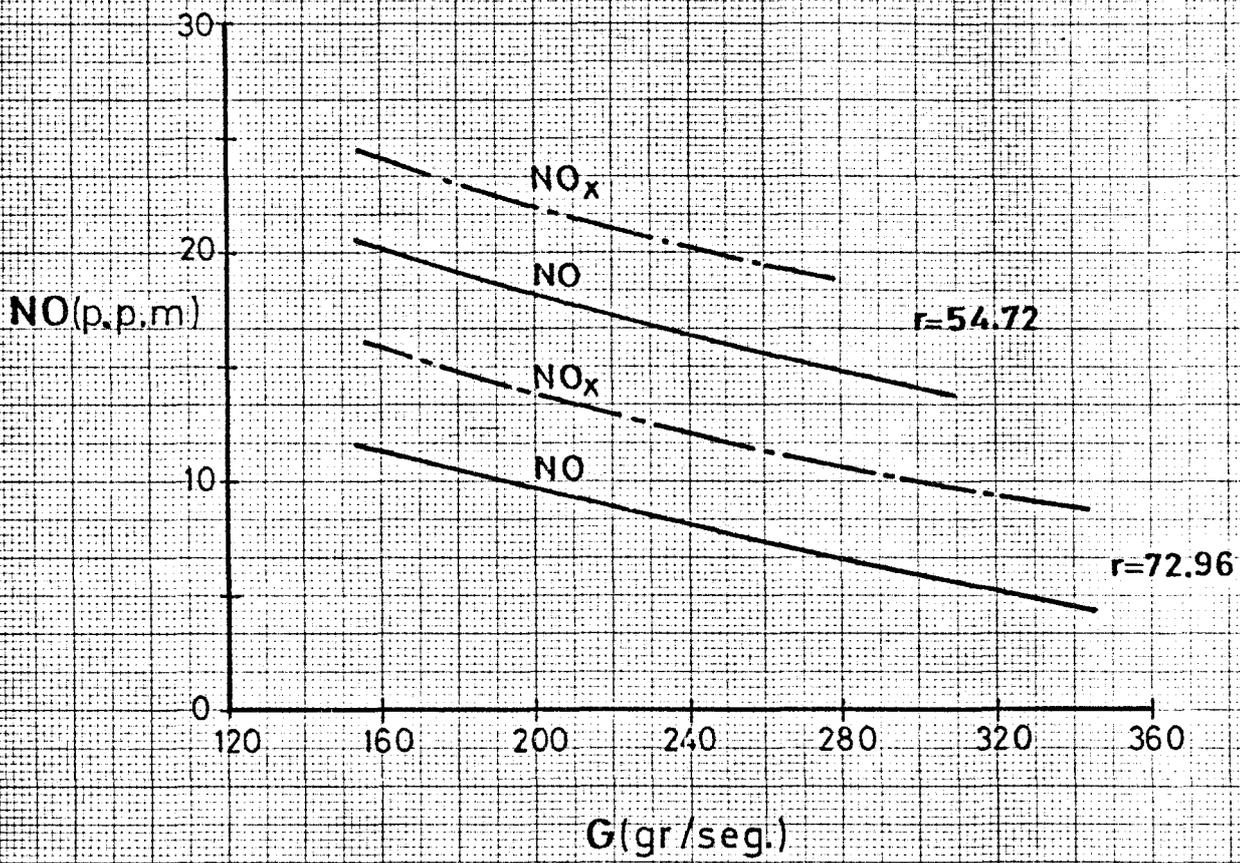


FIG. 4-25

T A B L A núm.4-11

ACTUACIONES DE CAMARA CON ISOCTANO VAPORIZADO

$$p_0 = 708,4 \text{ mm.Hg} ; \quad T_0 = 296^\circ\text{K}$$

$r = 72,96$ (relación global aire/combustible en peso)

Gasto de aire (gr/seg.)	{NO} (p.p.m.)	{NO _x } (p.p.m.)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	T ₃ (°K)	T ₄ (°K)
154	11,5	16	713	868	868	888
218	8,8	13,5	673	883	993	1028
218	9,3	10,3	683	883	998	1033
272	7	9,5	688	878	988	1033
272	6,7	11,3	703	883	998	1043
308	5,5	10	688	873	973	1013
345	4,5	9	688	883	963	1000

$r = 54,72$

154	20,6	24,5	-	-	-	-
218	17,5	20,7	813	1003	1133	1203
218	17	21,5	813	1003	1138	1203
272	15,5	19	823	1013	1153	1223
272	14,7	19,2	823	1003	1153	1223

$r = 45,6$

218	25	27,5	898	1088	1243	1313
-----	----	------	-----	------	------	------

parables con los anteriores, se corrigieron las riquezas de forma que la energía introducida en la cámara a través del combustible sea la misma. De esta forma, se han realizado los ensayos para riquezas $r = 72,96$, $54,72$ y $45,60$; equivalentes a $r = 72,96$, $54,72$ y $45,60$, de los casos anteriores.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla núm. 4-12 y gráficos núms 4-26 y 4-27.

d) Actuaciones de cámara de distribución de gasto de aire variable y con combustible butano en fase gaseosa.

Como se indicó en la descripción de la instalación experimental, el objetivo primordial de esta instalación consiste en comprobar la máxima reducción que se obtiene de empobrecer la zona primaria de la cámara de combustión para una determinada riqueza global.

En la Tabla núm.4-13 y curvas discontinuas de las Figs. núms.4-28 y 4-29, se presentan los resultados obtenidos para una riqueza global $r = 76,82$.

A este respecto indicaremos que aunque todavía es posible empobrecer más la zona primaria, se altera tanto el funcionamiento de la cámara que los resultados no serían significativos. En efecto, al disminuir el flujo secundario, con respecto al primario, disminuye la penetración de los chorros y esto se traduce en un perfil de temperaturas con un núcleo muy ca-

ACTUACIONES DE CAMARA CON BUTANO

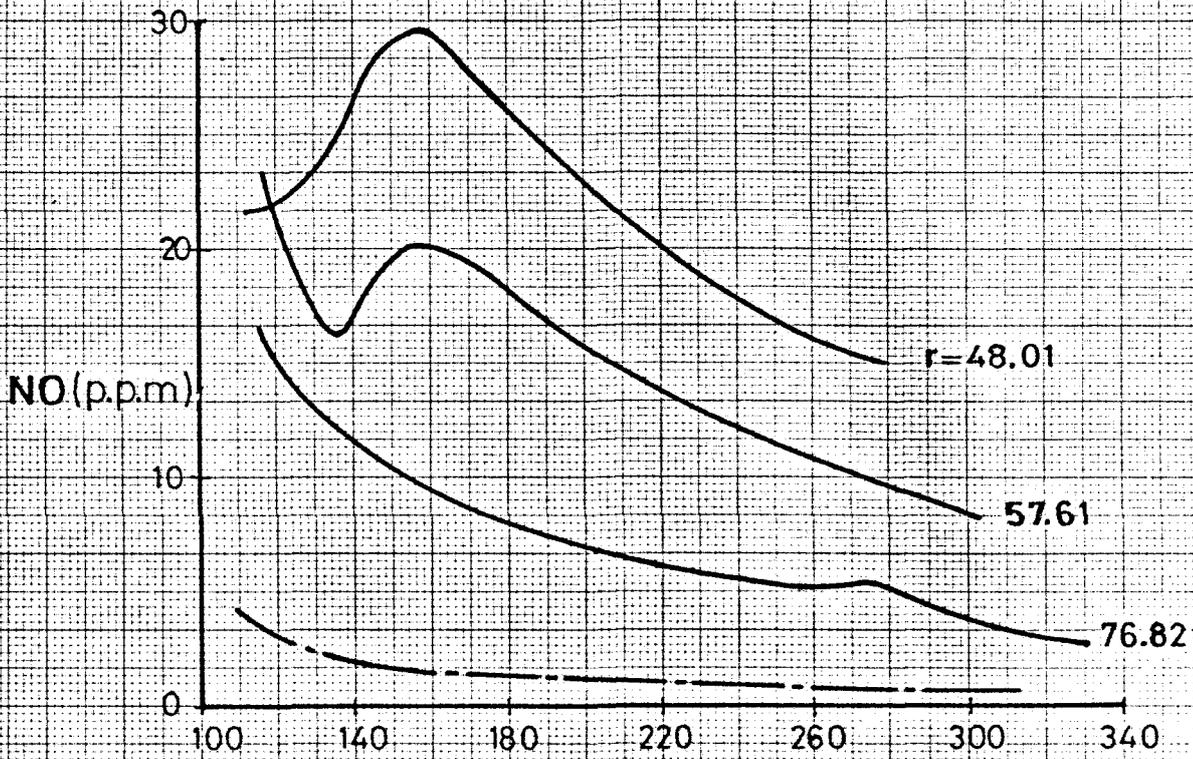


FIG. 4-26

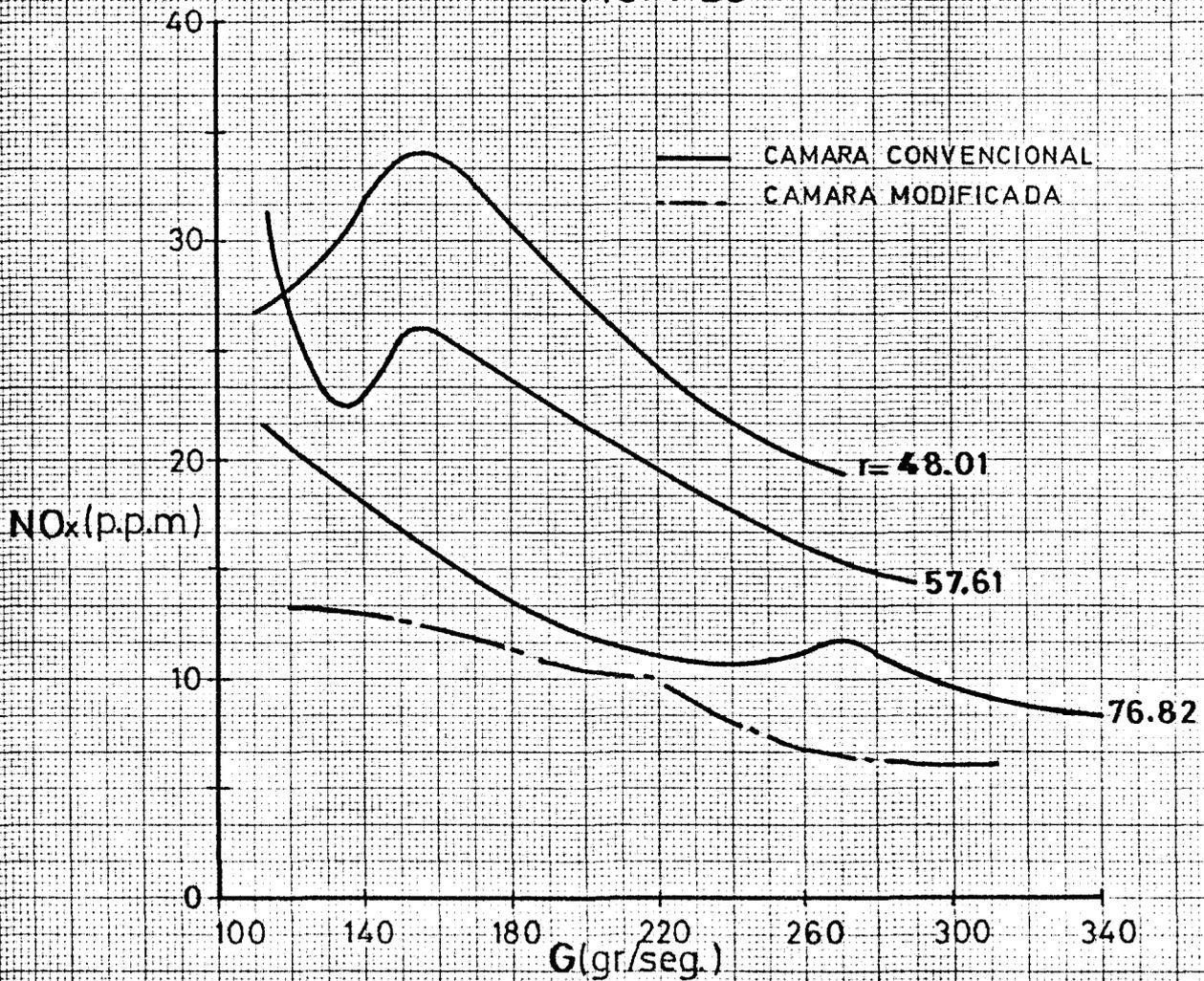


FIG. 4-27

COMPARACION DE RESULTADOS

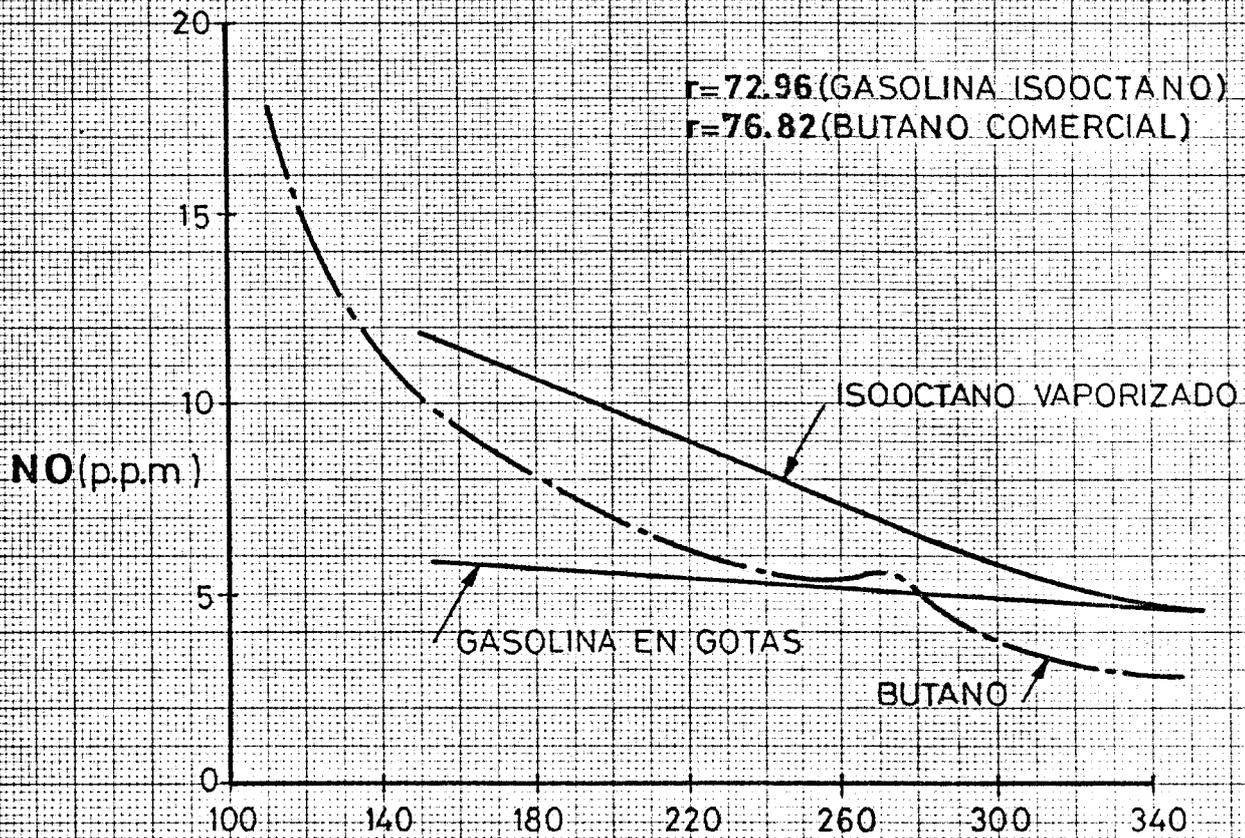


FIG. 4-28

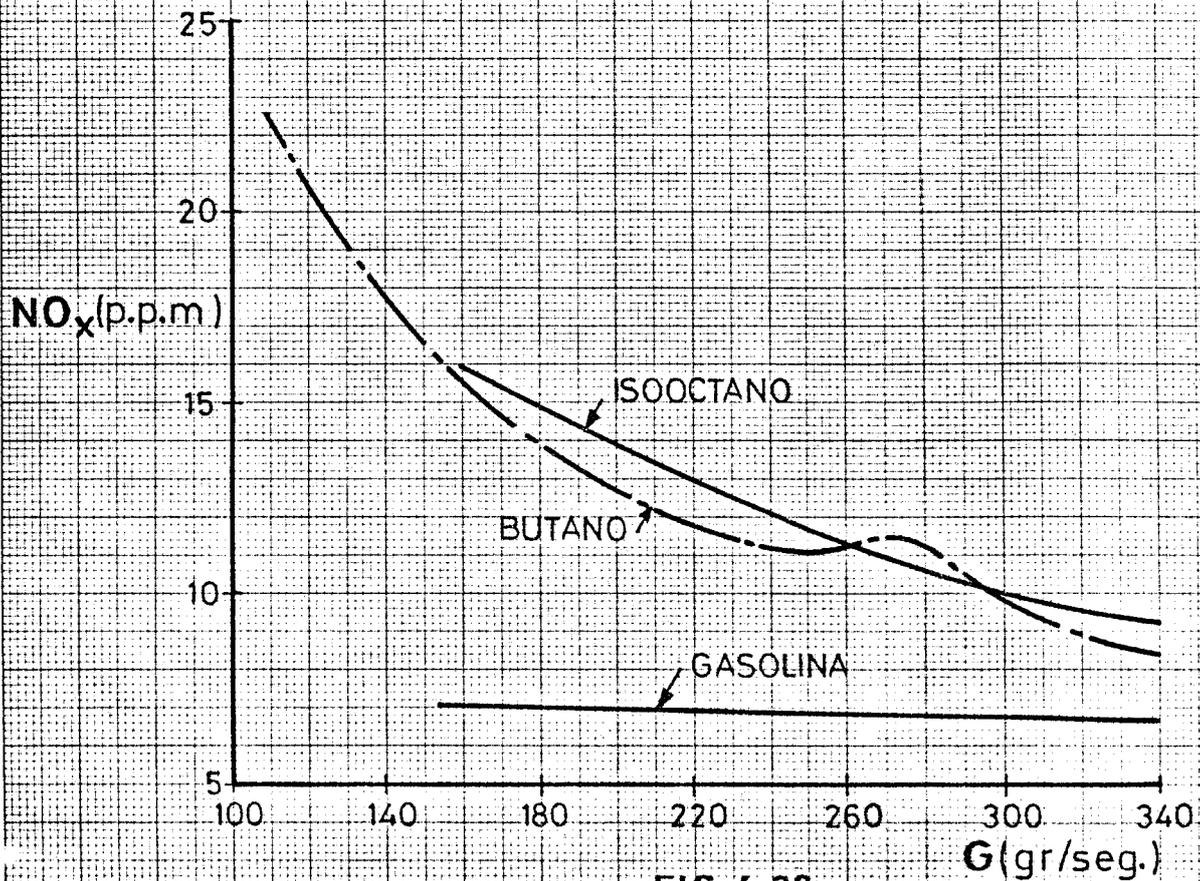


FIG. 4-29

T A B L A núm. 4-12
 ACTUACIONES DE CAMARA CONVENCIONAL
 COMBUSTIBLE BUTANO EN FASE GASEOSA

$P_a = 703,4 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_a = 19,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$

$r = 76,82$ (relación global aire/combustible en peso)

Gasto de aire (gr/seg.)	{NO} (p.p.m.)	{NO _x } (p.p.m.)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	T ₃ (°K)	T ₄ (°K)
114	16,8	21,8	703	823	828	778
114	16,5	21,5	693	815	823	-
134	13	18,5	696	851	851	813
155	10	16	673	836	883	828
155	9,5	16	-	-	-	-
155	10	16	683	843	863	813
155	8,5	14	663	803	858	803
219	6,3	11,8	643	815	918	843
218	7	11,5	663	828	928	848
246	5,2	10,5	651	826	913	843
273	6,3	13	673	828	943	863
273	4,7	10,7	703	873	993	913
273	4	9,5	653	813	893	823
310	3-3,3	9-9,5	676	808	923	863
310	3	9,7	683	818	933	863
309	3,5	9	673	803	913	843
346	2,8	8	658	793	903	838
$r = 57,61$						
114	24,2	31	793	948	973	923
114	25	31	828	973	986	930
114	24	31,5	818	963	986	933
134	16,5	22	813	963	978	933
134	16,5	22,5	813	973	978	943
155	20,5 - 21	27	798	968	998	973

.

Tabla núm. 4-12(Continuación)

Gasto de aire	{NO}	{NO _x }	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄
155	19	24,5-25	773	953	978	933
155	19	25	778	953	973	933
187	17,5	22-22,5	728	953	1093	1013
191	17	22	758	983	1108	1018
211	15,5	21,5	738	968	1098	1013
219	13-13,5	18,5	736	948	1073	993
219	13-13,5	19	731	943	1078	1003
218	13	18,5	738	958	1088	993
246	11,5	17,5	758	948	1083	1003
r = 48,01						
114	23,5	27,5	908	1043	1073	1023
114	21-21,5	27	900	1037	1080	1028
114	20	27-27,5	898	1048	1073	1033
134	23	28,5	868	1038	1063	1028
134	24,5	29,5	893	1058	1088	1063
134	24,5	29,5	903	1063	1098	1083
155	29 - 30	35	838	1063	1123	1098
155	30	34	853	1063	1108	1118
155	29	33	858	1053	1108	1088
187	23,5	27,5-28	803	1058	1198	1133
187	24	29,5	791	1043	1198	1113
187	25	29	808	1048	1198	1113
218	20	24	803	1028	1183	1093

liente y el resto frío, lo que empieza a acusarse ya para el caso estudiado, según se depende de los datos de la Tabla núm. 4-13.

No se presentan resultados para las riquezas $r = 57,61$ y $48,01$, debido al mal funcionamiento de la cámara para estos casos, ya que se producían oscilaciones de alta frecuencia conocidas, en la literatura, con el nombre de "screening" por su sonoridad característica.

e) Comparación de resultados.

La comparación de los resultados anteriormente mencionados puede verse en las Figs. núm. 4-28, 4-29, 4-30, 4-31, 4-32 y 4-33.

T A B L A núm.4-13
 ACTUACIONES CAMARA MODIFICADA
 COMBUSTIBLE BUTANO EN FASE GASEOSA
 $P_a = 707,9$; $T_a = 22^\circ\text{C}$

$r = 72,96$ (relación global peso aire - peso de combustible)

Gasto de aire (gr/seg.)	{NO} (p.p.m.)	{NO _x } (p.p.m.)	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	T ₃ (°K)	T ₄ (°K)
114	3,5 - 4,5	13 - 14	648	843	858	973
155	1	11,5	578	773	878	1103
155	1,5-2	13	603	798	908	1123
219	1	10	583	753	863	1083
219	1	10	-	-	-	-
219	1	9,5	583	748	853	1073
246	1	8,5	573	718	833	1053
272	0,5-1	6,5 - 7,5	543	708	973	1073
309	1	6 - 6,3	533	663	973	1003

COMPARACION DE RESULTADOS

$r = 57.61$ (BUTANO)

$r = 54.72$ (GASOLINA, ISOOCTANO)

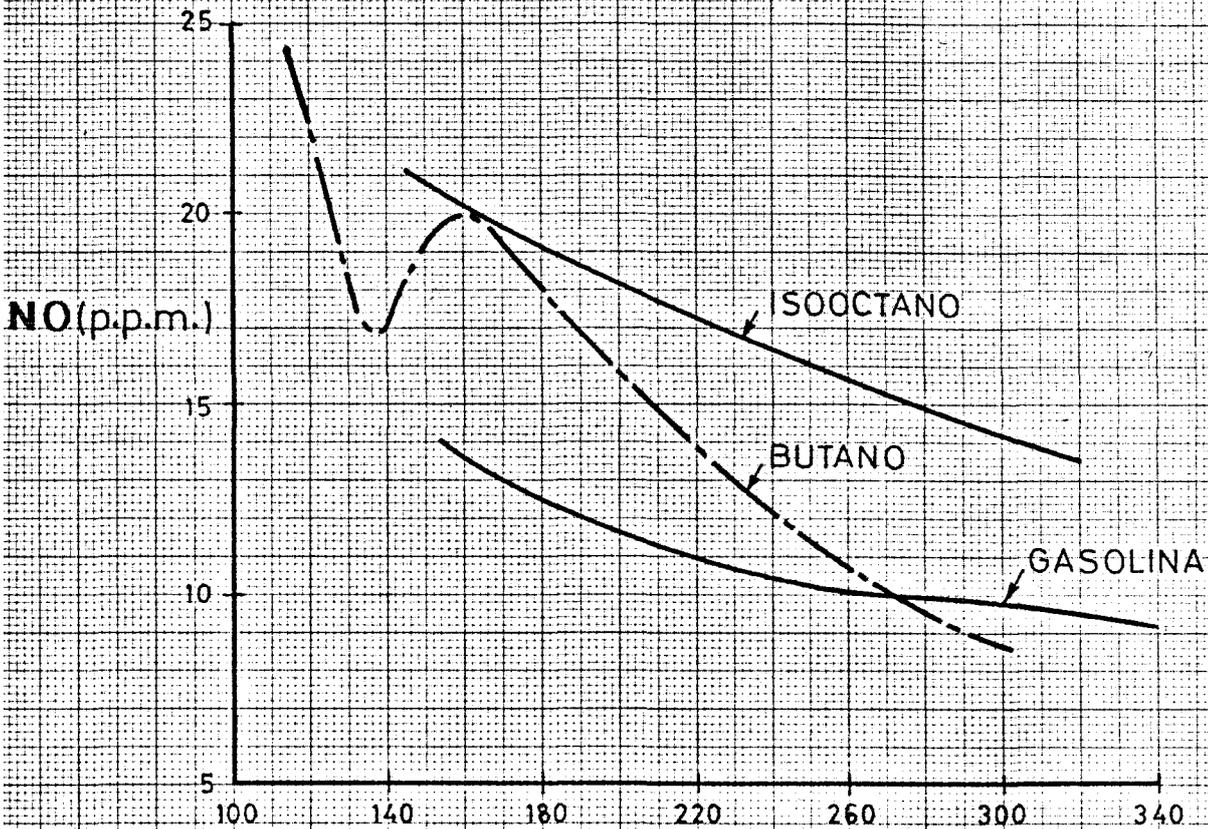


FIG. 4-30

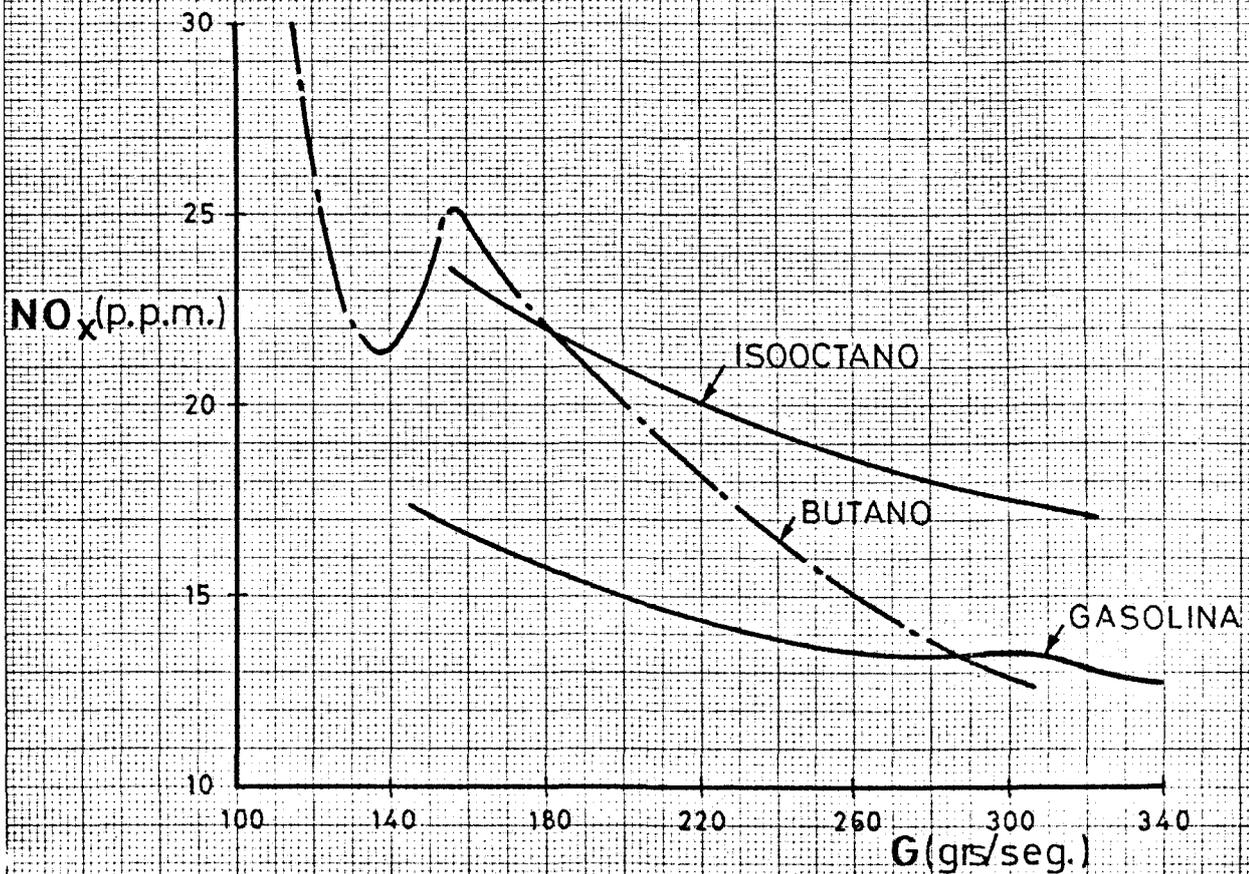


FIG. 4-31

COMPARACION DE RESULTADOS

$r=48.01$ (BUTANO)

$r=45.60$ (GASOLINA, ISOCTANO)

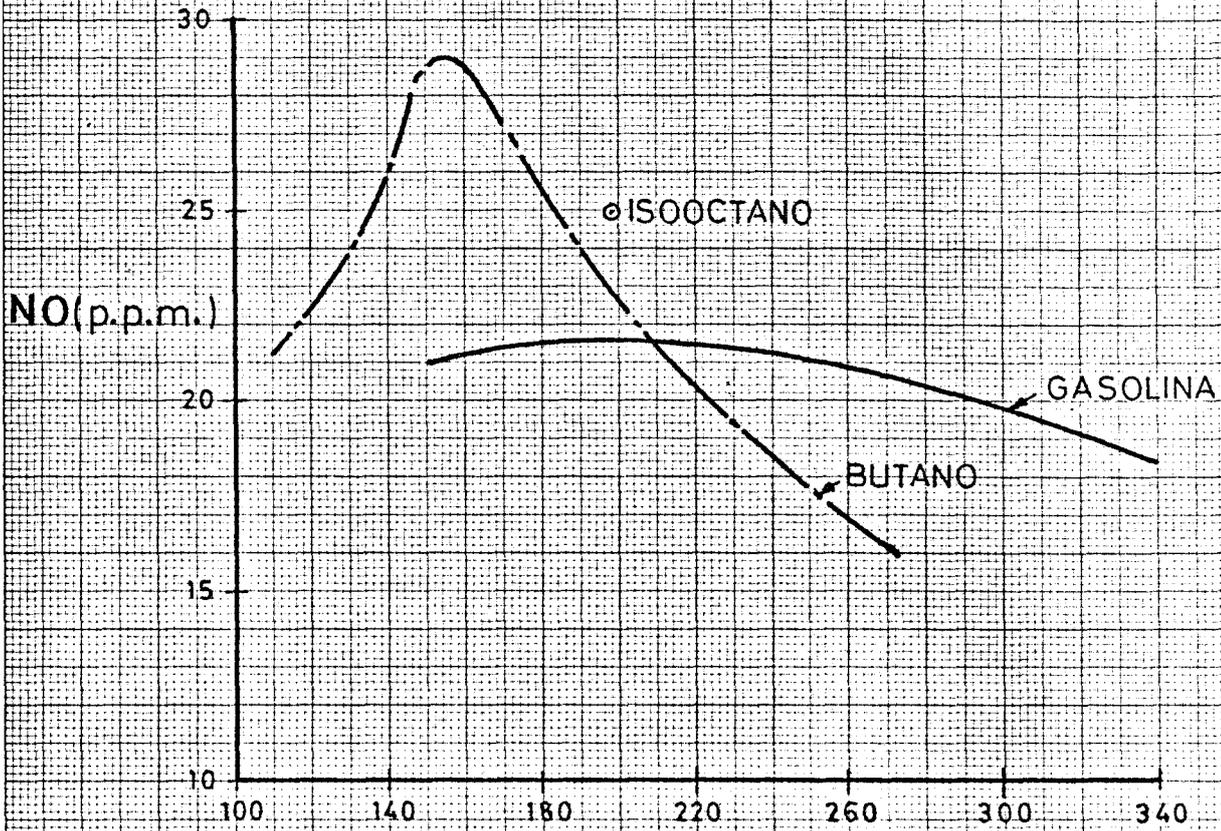


FIG. 4-32

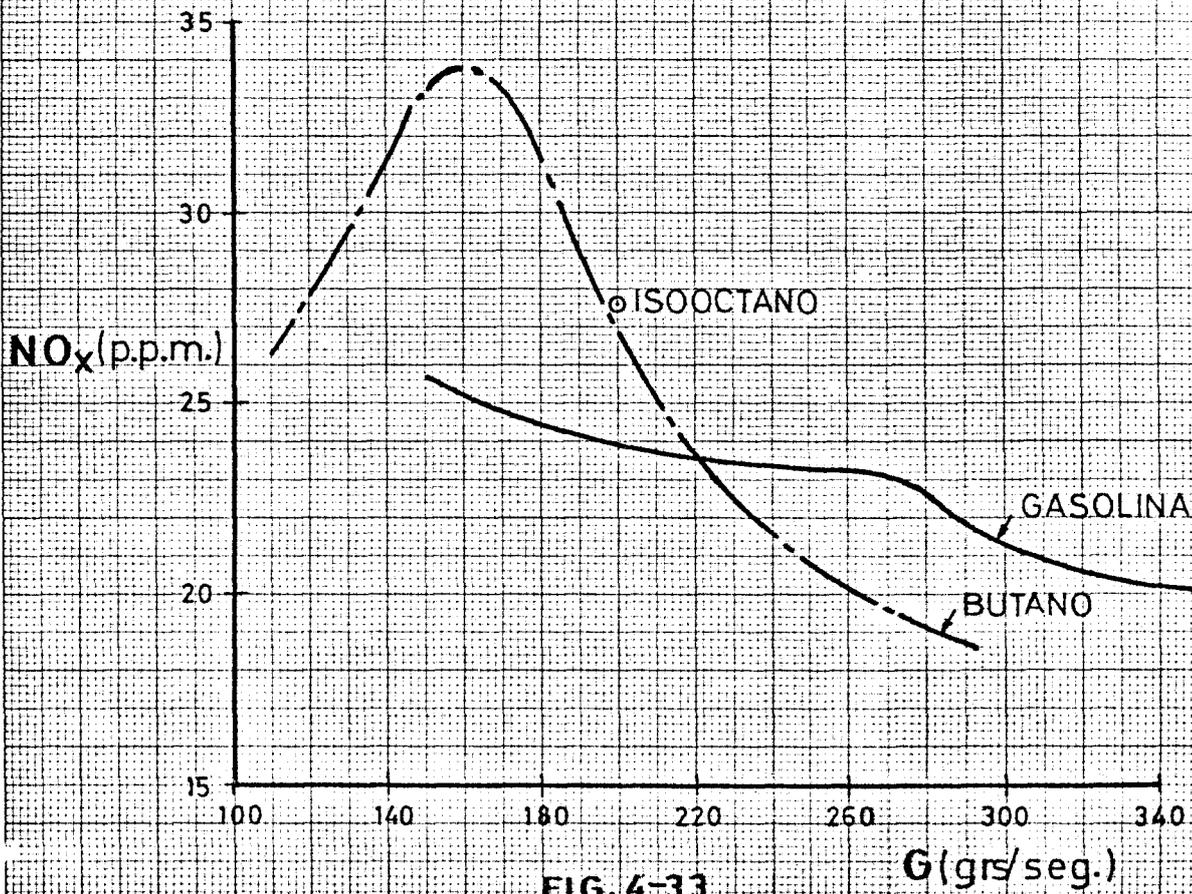


FIG. 4-33

G (grs/seg.)

4.4 Conclusiones

De los resultados del programa experimental que acaba de exponerse, se han obtenido las principales conclusiones siguientes:

a) Al aumentar la relación aire/combustible, con gasto constante de aire se produjeron importantes disminuciones en los óxidos de nitrógeno formados. Aumentos del orden del 50% en dicha relación, produjeron disminuciones del orden del 500%, mostrando la fuerte dependencia del proceso de formación de NO_x con la temperatura. Estos resultados eran previsibles ya que son cualitativamente conocidos e incluso son susceptibles de ser calculados aproximadamente.

Para el cálculo de la concentración resultante de óxidos de nitrógeno en una cámara de combustión real, tal como la utilizada en nuestros ensayos, existe la gran dificultad de la turbulencia, que como en la mayoría de los procesos tecnológicos de la combustión introducen una dificultad esencial en los modelos teóricos.

Cuando la combustión es laminar, la formación de NO se calcula con los métodos expuestos en el capítulo III, siendo en estos casos la difusión de tipo molecular.

La turbulencia introduce un fuerte mezclado a escala macroscópica, resultando una difusión turbulenta, generalmente

más importante que la difusión molecular. En el caso límite de turbulencia muy intensa se admite que el grado de mezcla local es completo, y en estas condiciones el proceso de combustión se reduce fundamentalmente al estudio de un proceso cinético-químico, que puede ser calculado mediante los modelos desarrollados en el capítulo II.

Un ejemplo teórico de estos dos casos extremos se muestra en la Fig.4-34, adaptada de la ref.4-105, en la que se dan los valores medios de la concentración de NO en función de la temperatura alcanzada, a una distancia de unos 30 cm aguas abajo de dos corrientes paralelas de aire y combustible gaseoso.

El problema estriba en la gran diferencia existente entre los dos casos extremos. El proceso real en una cámara de combustión es siempre un caso intermedio y, por tanto, muy poco asequible a cálculos cuantitativos.

b) A riqueza constante, al aumentar el gasto de aire disminuye considerablemente la proporción de óxidos de nitrógeno formados, como puede verse en las figuras 4-23 y 4-31, por ejemplo. Este resultado se explica por la disminución del tiempo de residencia al aumentar la velocidad media de los gases en la cámara. Cualitativamente este fenómeno era también previsible, y por las mismas razones expuestas en el apartado anterior solamente puede ser calculado en forma aproximada.

COMPARACION DE LOS DOS CASOS EXTREMOS DEL EFECTO DE MEZCLADO TURBULENTO EN LA FORMACION DE NO

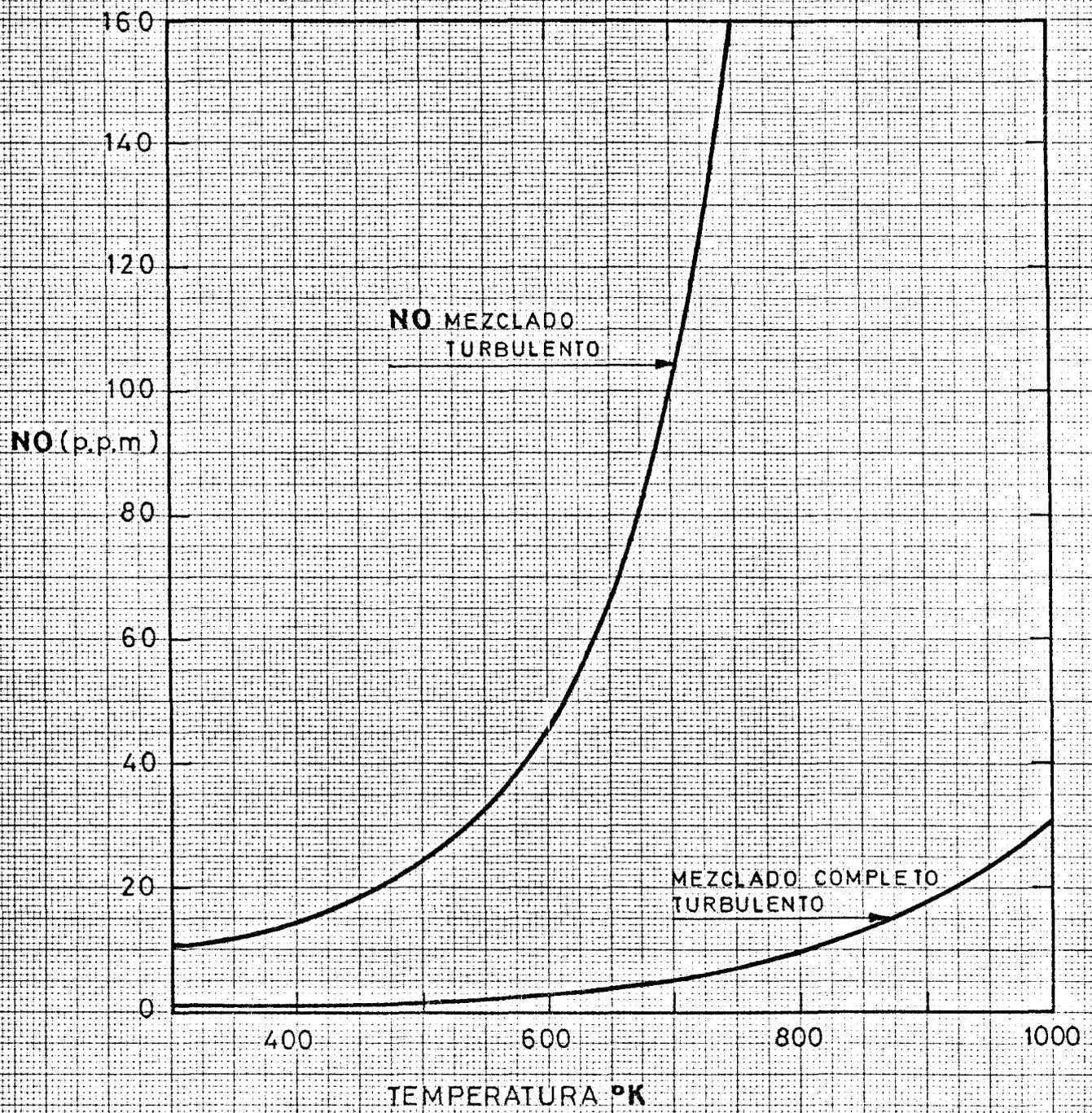


FIG. 4-34

c) La presencia de gotas en la combustión, en comparación con la combustión del combustible pre-vaporizado, se muestra en las figuras 4-23 y 4-25. En contra de lo predicho en diversos estudios teóricos (ref.4-58, por ejemplo), puede apreciarse que a igualdad de riqueza y gasto la cantidad de NO formado cuando existan gotas es aproximadamente igual (e incluso menor) que en el caso de emplear isooctano vaporizado. (*)

Los modelos que predicen una fuerte formación de NO en la combustión de gotas se basan en condiciones laminares y en frentes de llamas rodeando las gotas individualmente, con lo que resultan fuertes picos de temperatura en estos frentes de llama, sensiblemente iguales a las temperaturas resultantes en condiciones estequiométricas, independientemente de las relaciones globales aire/combustible que puedan existir en la cámara.

Los resultados obtenidos se explican al considerar que los efectos combinados de la convección forzada, (ya que las gotas se mueven respecto a los gases que las rodean) y turbulencia, impiden la existencia de frentes individuales de llamas y las gotas actúan como frentes de vaporización de combustible evaporándose dentro de una llama común a todas ellas (**).

(*) Resultados obtenidos con isooctano en gotas fueron los mismos que se obtuvieron con gasolina.

(**) G. Millán y C. Sánchez Tarifa "Combustion of Droplets. Forced Convection and Interaction Effects". II European Aeronautical Congress. Scheveningen. Holanda 1956.

d) La influencia del tipo de combustible (Figs.4-32 y 4-33) es pequeña en la formación de NO y NO_x, siendo las deformaciones observadas probablemente debidas a modificaciones en las condiciones locales de la combustión, al tratarse de un combustible líquido y los otros dos gaseosos.

e) La cantidad total de óxidos de nitrógeno formados (NO_x) fue siempre mayor que la de NO. Con riquezas altas y bajos gastos de aire ambas concentraciones no difirieron en más de un 10-20%. Por el contrario, cuando la formación de óxidos de nitrógeno fue más reducida (valores grandes de la relación aire/combustible y del gasto de aire), la concentración de NO_x llegó a alcanzar valores próximos al doble del valor del NO (véase Fig.4-25, por ejemplo). Esta conclusión es importante, ya que en muchos modelos teóricos se supone que no existe más que NO.

f) Las investigaciones sobre efectos del grado de mezcla inicial no han podido concluirse dentro de este programa.

Se ha preparado una instalación experimental para alimentar la cámara de combustión con mezclas gaseosas aire/butano con distintos grados de mezclado, lo que se consigue inyectando dichos gases en puntos diferentes en un largo tubo de mezclado adosado anteriormente a la cámara de combustión (Fig. 4-22), instalación que está en vías de modificación, al presentarse problemas de retrocesos de llamas, como anteriormente se ha mencionado.

Para medir el grado de mezclado se adaptó una sonda sónica especial desarrollada por Brown y Rebollo (ref.4-108), sonda de respuesta rápida y que permite medir la condición local de la composición de la mezcla.

La teoría de esta sonda, utilizada en combinación con un anemómetro de hilo caliente, se expone en un apéndice de este capítulo.

Se procedió a continuación al tarado de la sonda para mezclas aire-butano, que también se incluye en el apéndice citado.

El funcionamiento de la sonda se basa en la diferencia de pesos moleculares entre las especies, y en las primeras mediciones efectuadas en la cámara de combustión se comprobó que la sensibilidad no era suficiente para estas mezclas butano-aire (*).

Por ello, se está adoptando la instalación para su funcionamiento con hidrógeno como combustible, lo que formará parte de un nuevo programa de investigación, para cuyo desarrollo habrá sido fundamental la tecnología y conocimientos obtenidos en el presente programa de investigación subvencionado por la Fundación Juan March.

(*) La sonda fue inicialmente desarrollada para estudiar el mezclado turbulento de corrientes nitrógeno-helio.

4.5 Referencias

- 4-1 WIMMER, D. B. : "Nitrogen Oxides and Engine Combustion"
Mc REYNOLDS, L.A. Tran S.A.E. 70, 1962.
- 4-2 MYERS, P.S. : "Air Pollution from Automobile Exhaust"
UYEHARA, O.A. S.A.E. Paper 680241.
- 4-3 BOWDITCH, F.W. : "The Automobile and Air Pollution"
S.A.E. Paper 680242.
- 4-4 SWATMAN, I.M. : "Development of the Ford 704 Gas Turbine
Engine"
SAE Transaction, Vol.70 (1962),
pg. 109 - 121.
- 4-5 HUEBNER, G.J.Jr.: "Chrysler's Gas Turbine Car"
Trabajo 777 A presentado al SAE Automative
Engineering Congress, Detroit,
Enero 1964.
- 4-6 TURUNEN, W.A. : "The General Motors Research GT-309
and
COLLMAN, J.S. SAE Transactions, Vol.74 (1966),
pg. 357 - 377.
- 4-7 PEITSH : "A Gas Turbine Super Transport Truck
and
SWATMAN, I.M. SAE Transactions, Vol.74 (1966),
pg. 107 - 135.
- 4-8 GUERNSEY, R.W. : "Field Experience with GMT-305 Gas Tur-
bine in Military Applications"
SAE Transaction, Vol.70 (1962),
pg. 618 - 643.
- 4-9 JOHSON, L.E. : "Evolution of a Turbine Engine for In-
and
AAVIS, W.W. Trabajo 660035 presentado en el SAE
Automative Engineering Congress, De-
troit, Enero 1966.

.

- 4-10 REID, R., : "Oxides of Nitrogen from Air Added in
MINGLE, J.G. Exhaust Parts"
and PAUL, W. S.A.E. Paper 660115, Enero 1966.
- 4-11 STARKMAN, E.S. : "Characteristics of the Expansion of
and Reactive Gas Mixtures as Occurring
NEWHALL, H.K. in Internal Combustion Engine Cycles"
S.A.E. Trans 74, 826, 1966.
- 4-12 NEBEL, G.J. : "Some Factors Affecting the Concentra-
and tion of Oxides of Nitrogen in Exhaust
JACKSON, M.W. Gases from Spark Ignition Engines"
J. Air Pollution Control Association
Vol.8, Núm. 3.
- 4-13 CAMPU, R.M. : "Continuous Mass Spectrometric Determi-
and nation of Nitric Oxide in Automobile
NEERMAN, J.C. Exhaust"
S.A.E. Trans. 75, 583, 1967.
- 4-14 STARKMAN, E.S. : "Engine Generated Air Pollution -
A Study of Source and Severity"
XI Congress of FISITA 1966.
- 4-15 DANIEL, W.A. : "Engine Variable Effects on Exhaust
Hydrocarbon Composition"
S.A.E. Paper 670124, 1967.
- 4-16 STARKMAN, E.S. : "Fundamental Processes in Nitric Oxide
and Carbon Monoxide Production from
Combustion Engine"
XII Congress of FISITA Paper 2-21,1968.
- 4-17 NEWHALL, H.K. : "Direct Spectroscopic Determination of
and Nitric Oxide in Reciprocating Engine
STARKMAN, E.S. Cylinders"
S.A.E. Paper 670122.
- 4-18 LOZANO, E.R. : "Air Pollution Emissions from Jet Engines"
MELVIN, W.W. J. of the Air Pollution Control Asso-
and HOCHSEISER ciation, Vol. 18, 1968, pp. 392-394.
- 4-19 DURRANT, T. : "Atmospheric Pollution by Gas Turbine En-
gine" Rolls-Royce Journal, 1968.

- 4-20 VERDUZIO, L. : "The Air Recirculation Ratio in Can-type
and
CAMPALLARO, P. Gas Turbine Combustors"
Cranfield International Propulsion Symposium.
- 4-21 GRADON, K. : "Combustion Development on the Rolls-
and
MILLER Royce Spey Engine"
Combustion in Advanced Gas Turbine Systems, 45-78.
- 4-22 KORTH, M.W. : "Emissions for a Gas Turbine Automobile"
and
ROSE, A.H., Jr. Trabajo 680402 presentado en el SAE
Mid-Year Meeting, Detroit, Mayo 1968.
- 4-23 LIBERMAN, A. : "Composition of Exhaust from a Regenerative
Turbine System"
Journal Pollution Control, Vol. 18
No. 3, Marzo 1968, pg. 149-153.
- 4-24 WAY, B. : "Combustion in the Turbojet Engine"
Selected Combustion Problems II, AGARD,
296-327.
- 4-25 Nature and Control of Aircraft Engine Exhaust Emissions
(NREC Report núm. 1134-1), Northern Research and Engineering
Corporation, Cambridge, Massachusetts, Noviembre 1968.
- 4-26 "Development of Methodology for Characterization of Emission
from Aircraft Sources,"
EPA Contract 68-02-1236.
- 4-27 BENSON, J.D. : "Reduction of Nitrogen Oxides in Automobile
Exhaust"
S.A.E. Paper 69.0019, 1969.
- 4-28 GLASS, W., : "Evaluation of Exhaust Recirculation
RUSSELL, F.R., for Control of Nitrogen Oxides Emissions"
WADE, D.T. and
HALLABAUGH, D.M. S.A.E. 70.0146.
- 4-29 WAGNER, T.O. : "CRC Evaluation of Aviation Emissions.
Measurements Techniques."
SAE paper 700338, 1970.

- 4-30 LAVOIE, G.A. : "Experimental and Theoretical Study of
HEYWOOD, J.B. Oxide Formation in Internal Combustion
and Engine"
KECK, J.C. Combustion Science and Technology, 1970.
- 4-31 STARKMAN, E.S. : "The Role of Chemistry in Gas Turbine
MIZUTANI, Y., Emissions"
SAWYER, R.F. and ASME paper 70-GT-81.
TEIXEIRA, D.P.
- 4-32 HAMMOND, D.C. : "A Preliminary Investigation of Gas Tur
bine Combustor Modeling"
Comb. Sci. Tech. 2, 67-80.
- 4-33 MYERS, P.S. : "Automobile Emissions - A Study in Envi
ronmental Benefit Versus Technological
Costs"
S.A.E. Paper 70-0182, 1970.
- 4-34 HEYWOOD, J.B. : "Jet Aircraft Pollutant Production and
FAY, J.A. and Dispersion"
LINDEN, L.H. Paper 70-155, AIAA, 1970.
- 4-35 STARKMAN, E.S. : "Formation of Exhaust Emissions in the
Combustion Chamber"
U.S. Department of H.E.W. 1970.
- 4-36 Data National Air Pollution Control Administration.
Febrero 1970.
- 4-37 EYZAT, P. : "A New Look at Nitrogen Oxides Formation
and in Internal Combustion Engine"
GUIBET, J.C. S.A.E. Paper 680124.
- 4-38 STARKMAN, E.S. : "Some Basic Considerations in Formation
of Combustion Engine Exhaust Products"
U.S. Department of H.E.W. 1970.
- 4-39 LAVOIE, G.A. : "Spectroscopic Measurement of Nitric
Oxide in Spark Ignition Engines"
Combustion and Flame 1970.

- 4-40 SAE Aerospace Recommended Practice 1179, "Aircraft Gas Turbine Engine Exhaust Smoke Measurement," Society of Automotive Engineers, New York, NY, 4 Mayo 1970.
- 4-41 CORNELIUS, W. : "The Formation and Control of Nitric and WADE, W.R. Oxide in a Regenerative Gas Turbine Burner." General Motors Research Laboratories SAE. Septiembre 1970.
- 4-42 TOMANY, J.P. : "A Survey of Nitrogen-Oxides Control KOPPANG, R.R. Technology and the Development of a and BURGE, H.C. Low NO_x Emission Combustor" A.S.M.E. Julio 1971.
- 4-43 EDELMAN, R. : "A Mathematical Model for Jet Engine and ECONOMOS, C. Combustor Pollutant Emissions" AIAA paper, N° 71-714, 1971.
- 4-44 HEYWOOD, J.B. : "Gas Turbine Combustor Modeling for Calculating Nitric Oxide Missiones" AIAA, paper N° 71-712, 1971.
- 4-45 HAMMOND, D.C. : "Analytical Calculations for the Per- and MELLOR, A.M. formance Pollutant Emissions of Gas Turbine Combustors" AIAA paper N° 71-711, 1971.
- 4-46 ROBERTS, R., : "An Analytical Model for Nitric Oxide AELTO, L.D., Formation in a Gas Turbine Combustion KOLLRACK, R. and Chamber" BONELL, J.M. AIAA paper N° 71-715, 1971.
- 4-47 PRATT, R.T. : "Prediction of Nitric Oxide Formation BOWMAN, B.R. and in Turbojet Engines by PSR Analysis" CROWE, C.T. AIAA paper N° 71-713, 1971.
- 4-48 KAUPERT, A.W. : "Modified I.C. Engine Reaches Proposed and CHEKCLICK, G.E. 1980 Emission Goals." Jour S.A.E. Febrero 1971.
- 4-49 BOWNSON, D.A. : "Factor Influencing the Effectiveness and STEBAR, R.F. of Air Injection in Reducing Exhaust Emission."

- 4-50 DE PALMA, T.V. : "Emission Control by Catalist"
Automobile Engineer, Marzo 1971.
- 4-51 SANCHEZ-TARIFA, C.: "Los turborreactores y turbinas de gas
como fuente de contaminación"
Revista Ingeniería Aeronáutica 1971.
- 4-52 SANCHEZ-TARIFA, C.: "La Turbina de Gas en Automoción. Ca-
racterísticas de las Emisiones".
Congreso Internacional de la Calidad
en Automoción. Barcelona, 1971.
- 4-53 WADE, W.R. : "Emission Characteristics of Continuous
and
CORNELIUS, W. Combustion Systems of Vehicles Power-
plants-Gas Turbine, Steam, Stirling.
General Motors Research Laboratories,
Septiembre 1971.
- 4-54 CHAMPAGNE, D.L., "Standard Measurement of Aircraft Gas
Turbine Engine Exhaust Smoke,"
ASME Paper N° 71-GE-88.
- 4-55 CHESTERS, A.K. : "Prediction of the Effect of Engine Ge-
ometry on Aircraft Smoke Visibility,"
ASME Paper N° 71-WA/GT-10.
- 4-56 PALCZA, J.L., : "Study of Altitude and Mach Number Ef-
fects on Exhaust Gas Emissions of an
Afterburning Turbofan Engine,"
Federal Aviation Administration Re-
port FAA-RD-72-31, Diciembre 1971.
- 4-57 "Low-Power Turbopropulsion Combustor Exhaust Emissions,"
AFAPL Contract F33615-71-C-1870.
- 4-58 KESTEN, A.S. : "Analysis of NO Formation in Single
Droplet Combustion."
Combustion Science and Technology,
Vol.6, 1972.
- 4-59 AMANN, C.A., : "Some Factors Affecting Gas Turbine Pas-
WADE, W.R. senger Gas Emission."
and
YU, M.K. General Motors Research Laboratories
S.A.E. Enero 1972.

- 4-60 "AFR 19-2: Air Force Guidance on Major Actions Significantly Affecting the Quality of the Human Environment," 20 Enero 1972.
- 4-61 "Aircraft Emissions: Impact on Air Quality and Feasibility of Control," Environmental Protection Agency, Febrero 1972.
- 4-62 "AFR 19-1: Protection and Enhancement of Environmental Quality," 18 Febrero 1972.
- 4-63 COLK, E.W. : "President, General Motors Corporation: Progress Toward Achieving 1975 and 1976 Federal Emission Standards American Petroleum Institute, Septiembre 26, 1972.
- 4-64 BLAZOWSKI, W.S., : "Assessment of Pollutant Measurement and
HENDERSON, R.E. Control Technology and Development of Pollutant Reduction Goals for Military Aircraft Engines," AFAPL-TR-72-102, Noviembre 1972.
- 4-65 BOGDAN, L., : "Analysis of Aircraft Exhaust Emissions
and
Mc ADAMS, H.T. Measurements," Cornell Aeronautical Laboratories Report Number NA-5007-K-1.
- 4-66 LIPFERT, F.W. : "Correlations of Gas Turbine Emissions Data," ASME Paper 72-GT-60.
- 4-67 "Military Specification: Engines, Aircraft Turbojet and Turbofan, General Specifications, MIL-E-5007,"
- 4-68 LAZALIER, G.R., : "Measurement of Pollution Emissions
and
GEARHART, J.W. from an Afterburning Turbojet Engine at Ground Level, Part II - Gaseous Emissions," AEDC-TR-72-70, 1972.
- 4-69 DIEHL, L.A., : "Measurement of Gaseous Emissions from an Afterburning Turbojet Engine at Simulated Altitude Conditions," NASA-TM-X-2726.

- 4-70 SULLIVAN, R.W., : "A Brief Overview of the Energy Requirements of the Department of Defense," et al. Contract No. DAAH01-72-C-0982, (AD-754824).
- 4-71 COX, F.W., : "A Field Survey of Emissions from Aircraft Turbine Engines," Bureau of PENN, F.W., Mines Report of Investigation, CHASE, J.O. RI-7634, 1972.
- 4-72 RICHTER, B., : Presentation at Information Exchange Conference on Aircraft Pollution, AFAPL, Diciembre 1972.
- 4-73 BAHR, D.W. : "Control and Reduction of Aircraft Turbine Engine Exhaust Emissions," in Emissions from Continuous Combustion Systems, Plenum Press, New York, 1972, pp 345-373.
- 4-74 "Experimental Clean Combustor Program," NASA Lewis Research Center Contracts NASA-16830, NASA-16829.
- 4-75 "Investigation of Aircraft Gas Turbine Combustor Having Low Mass Emissions," Eustis Directorate, USAAMRDL Contract DAAJ02-72-C-0005.
- 4-76 Environmental Protection Agency, "Control of Air Pollution from Aircraft and Aircraft Engines," Federal Register, Vol 38, No. 136, 1973.
- 4-77 BLAZOWSKI, W.S., : "Prediction of Aircraft Gas Turbine NO_x WALSH, D.E. : Emission Dependence on Engine Operating Parameters and Ambient Conditions" MACH, K.D. AIAA Paper No. 73-1275, 1973.
- 4-78 GERMAN, R.C., : "Measurement of Exhaust Emissions from HIGH, A.D., a J85-GE-5B Engine at simulated High ROBINSON, C.E. Altitude, Supersonic, Free-Stream Flight Conditions, AEDC-TR-73-103, 1973.
- 4-79 DAVIDSON, D.L., : "Emissions Measurements of a J93 Turbo-jet Engine," AEDC-TR-73-132, Septiembre 1973.

- 4-80 "Development of an Emission Measurement Technique for Afterburning Turbine Engines," AFAPL Contract F33615-73-C-2047.
- 4-81 SHEARER, T.R. : "Environmental Impact Study on Aircraft Engine Pollution - 17th Bomb Wing (SAC), WPAFB", 1973.
- 4-82 STERGIS, C.G. : "Environmental Impact of B-1 Emissions in the Stratosphere," AFCRL-TR-73-0608, 1973.
- 4-83 ROGERS, D.W. : "F101 Engine Emissions Program - 1972," Report No. R73AEG133, General Electric Co., Evendale, Ohio, 1973.
- 4-84 MOSIER, S.A., : "Low-Power Turbopropulsion Combustor
ROBERTS, R. Exhaust Emissions," AFAPL-TR-73-36, 1973.
- 4-85 WORSHAM, J., : "Noise and Emissions Outlook for Military
BAHR, D., CORNELL, Engines," AIAA Paper No. 73-1156.
W., TAYLOR, R.
- 4-86 "Experimental Clean Combustor Program Briefing," Pratt and Whitney Aircraft Division, UAC, 1973.
- 4-87 "Experimental Clean Combustor Program Briefing," General Electric Company, Large Engine Group, 1973.
- 4-88 TROTH, D.L., : "Investigation of Aircraft Gas Turbine
VERDOUW, A.J., Combustor Having Low Mass Emissions,"
VERKAMP, F.J. USAAMRDL Technical Report 73-6, 1973.
- 4-89 VERKAMP, F.J., : "Impact of Emission Regulations on Fu-
VERDOUW, A.J., ture Gas Turbine Engine Combustors,"
TOMLINSON, J.G. AIAA Paper No. 73-1277, 1973.
- 4-90 FERRI, A. : "Reduction of NO Formations by Premixing,
NATO Advisory Group for Aerospace Re-
search and Development Conference
Proceedings 125, 1973.

- 4-91 Discussion during AIAA/SAE 9th Propulsion Conference, Las Vegas, Nevada, 1973.
- 4-92 Pratt & Whitney Aircraft, "F100-PW-100 Qualification Test Report for Smoke Sampling," Report FR5713, P&W Florida R&D Center, West Palm Beach, Florida, 1973.
- 4-93 GROBMAN, J., : "Forecast of Jet Engine Exhaust Emissions for Future High Altitude Commercial Aircraft," NASA-TM-X-71509, 1974.
INGEBO, R.D.
- 4-94 "Development of an Analytical Correlation Between Gas Turbine Engine Smoke Production and Jet Plume Visibility," AFAPL Contract F33615-74-C-2025.
- 4-95 BLAZOWSKI, W.S., : "Preliminary Study of the Catalytic Combustor Concept as Applied to Aircraft Gas Turbines," AFAPL-TR-74-32, 1974.
BRESOWAR, G.E.
- 4-96 ANDERSON, D., : NASA Lewis Research Center, Personal
MROZ, T. Communication, 1974.
- 4-97 FAUCHER, J. : "Aircraft Division, Personal Communication", 1974.
PRATT and
WHITNEY
- 4-98 CLODFELTER, R.G.: "Assessment of JP-8 as a Replacement Fuel for the Air Force Standard Jet Fuel JP-4," AFAPL-TR.
et al,
- 4-99 NORGREN, C.T., : "Emissions of Nitrogen Oxides from Experimental Hydrogen-Fueled Gas Turbine Combustor," NASA-TM-X-2997, 1974.
INGEBO, R.D.
- 4-100 DUNNAM, B.C. : "Air Force Experience in the Use of Liquid Hydrogen as an Aircraft Fuel," The Hydrogen Economy Miami Energy Conference (THEME), 1974.
- 4-101 ROBINSON, C.A., Jr. "NASA Plans Award on Engine Emissions," Aviation Week & Space Technology, pp 32-34, 1974.

- 4-102 MOLL, W. : "Updated F100 Emissions Estimate for F-15 Candidate Environmental Statement," Communication to ASD/JFEJ, Enero 1974.
- 4-103 SALVI, E., : "TF34-GE-100 Engine Qualification -
CHENEY, S.H. Exhaust Gas Emission Characteristics," Report R74AEG3, General Electric Company, Lynn, Massachusetts, 1974.
- 4-104 BLAZOWSKI, W.S.: "Aircraft Exhaust Pollution and its Ef-
HENDERSON, R.E. fect on the U.S. Air Force," AFAPL-TR-74-64, Agosto, 1974.
- 4-105 QUAN, V., : "Nitric Oxide Formation in Turbulent
MARBLE, F.E., Diffusion Flames"
KLIEGEN, J.R. KUB Engineering Inc. Tustin-Cal.

ANEXO AL CAPITULO NUM. 4

= = = = =

SONDA PARA LA MEDIDA DEL GRADO DE MEZCLA^(*)

Para conocer el grado de mezcla entre dos gases, en nuestro caso aire y combustible, debemos disponer de una sonda que reúna las siguientes características:

1°) Pequeño tamaño para que las perturbaciones del contorno sean mínimas y las medidas puntuales.

2°) La distribución de velocidades instantánea debe de ser uniforme en la zona ocupada por la sonda por lo que el tamaño de la sonda debe ser inferior a la longitud característica de la micro escala turbulenta, es decir, del orden de 1 mm.

3°) La inercia de la sonda debe ser lo suficientemente baja para proporcionar una respuesta en frecuencia del orden de 5000 c.p.s.

4°) Sensibilidad a las pequeñas diferencias de fluctuaciones.

5°) Estabilidad y resistencia para soportar las vibraciones causadas por el flujo turbulento.

Todas estas condiciones las cumple el anemómetro de hilo caliente, cuya descripción se realizará en otro apartado. Hay dos métodos usados para controlar el hilo caliente:

1°. Intensidad constante.- La intensidad a través del hilo se mantiene constante, cambiando la resistencia del hilo con las fluctuaciones del fluido.

2°. Temperatura constante.- Que es lo mismo que mantener la resistencia del hilo constante, cambiando la intensidad

^(*) La dirección de esta parte del trabajo ha estado a cargo del ingeniero aeronáutico Dr. M. Rebollo.

a través del hilo caliente con las fluctuaciones del fluido.

El método que se utilizará es el de temperatura constante. Este método minimiza el efecto de inercia térmica del hilo caliente. El inconveniente hasta hoy día era la inestabilidad del equipo electrónico.

DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DEL ANEMOMETRO DE HILO CALIENTE A TEMPERATURA CONSTANTE

El hilo caliente es una rama del puente de Wheatstone, según se ve en la Fig. 4-35. Dicho hilo suele ser de platino, iridio o tungsteno con diámetros de 5 a 10 micras y longitudes de 0,5 a 1 mm.

Se quiere mantener el hilo a una resistencia fija R_w para lo cual tiene que calentarse el hilo por medio de una intensidad de corriente.

El puente de Wheatstone está en equilibrio cuando la resistencia del hilo es R_w pero debido a las fluctuaciones de la velocidad y concentraciones del fluido el calor cedido por el hilo al medio ambiente varía, variando así la temperatura del hilo y con ello su resistencia haciendo que el puente se descompense dando una señal en la diagonal horizontal AB que por medio de un servo-amplificador da una señal en la diagonal vertical CD compensando el puente y manteniendo R_w constante.

La medición del voltaje E necesario para que R_w permanezca constante da las propiedades del fluido que se analiza.

ESTUDIO TEORICO

El calor cedido por el hilo caliente al fluido circun-

FUNCIONAMIENTO DEL ANEMOMETRO DE HILO CALIENTE
A TEMPERATURA CONSTANTE.

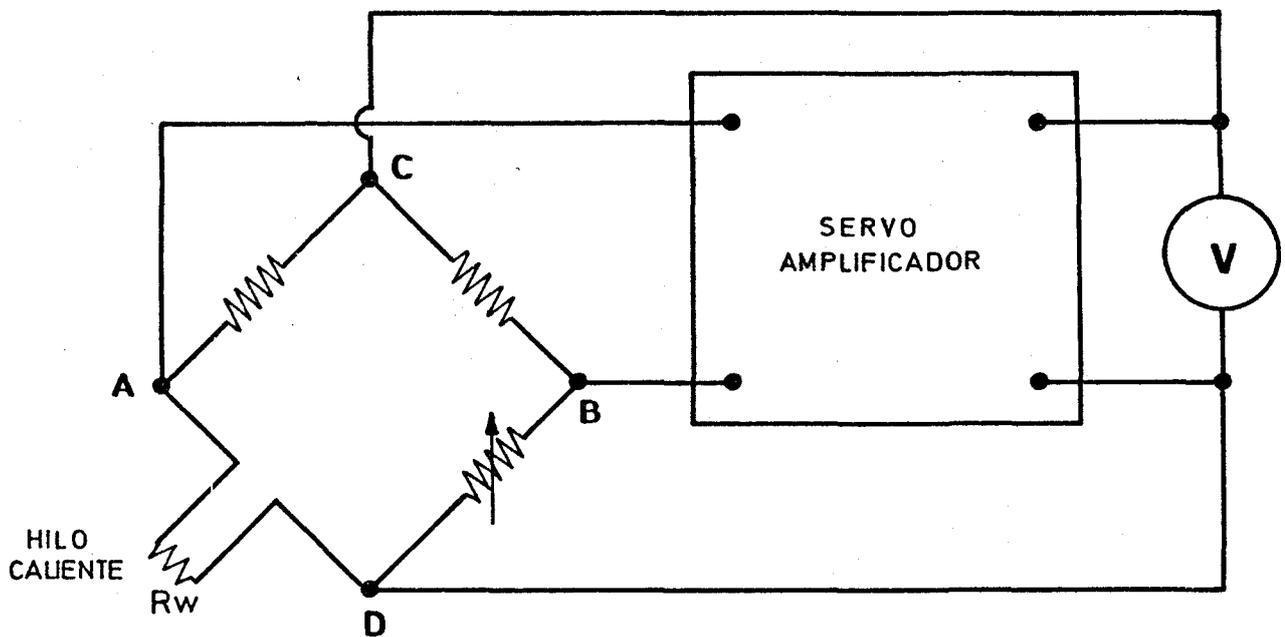


FIG. 4-35

dante depende de:

- La velocidad del fluido.
- Diferencia de temperaturas entre el hilo y el fluido.
- Propiedades físicas del fluido.
- Dimensiones y propiedades físicas del hilo.

La diferencia de temperaturas entre el hilo y el fluido, las dimensiones y propiedades del hilo son, generalmente, conocidas, por lo tanto si se conocen las propiedades del fluido se puede saber su velocidad, y en el caso de lo que se conozca sea la velocidad se deducen las propiedades del fluido, que puede ser la concentración de una mezcla.

El hilo es enfriado por:

- conducción
- convección libre y forzada (convección libre es despreciable para velocidades superiores a 1 ft/sg.)
- radiación (en general despreciable).

Hay relaciones empíricas que dan el calor cedido por un cilindro a una corriente perpendicular a su eje. Una de ellas dada por Kramer, válida para líquidos y gases.

$$Nu = 0,42 Pr^{1/5} + 0,57 Pr^{1/3} Re^{1/2}$$

$$Nu = \frac{hD}{K} \quad \text{Número de Nusselt}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K} \quad \text{Número de Prandtl}$$

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

h coeficiente de transferencia de calor

D diámetro del cilindro

K conductividad térmica
 μ viscosidad
 C_p calor específico a presión constante
 U velocidad del fluido
 ρ densidad del fluido

La validez de esta relación es para

$$0.01 < Re < 10000$$

Los valores de las propiedades del gas dados en la fórmula están referidos a la temperatura T_f .

$$T_f = \frac{T_w + T_g}{2}$$

T_w temperatura del hilo

T_g temperatura del gas.

El calor transferido por unidad de tiempo Q al gas procedente del hilo de longitud L y temperatura uniforme T_w es:

$$Q = DLh (T_w - T_g)$$

$$h = \frac{K}{D} (0,42 Pr^{1/5} + 0,57 Pr^{1/3} Re^{1/2})$$

$$Q = KL (T_w - T_g) \{ 0,42 (Pr)_f^{1/5} + 0,57 (Pr)_f^{1/3} (Re)_f^{1/2} \}$$

(f significa el valor del número adimensional a la temperatura T_f).

El calor perdido por unidad de tiempo debe ser igual al calor generado por unidad de tiempo por la corriente eléctrica a través del hilo, de valor $I^2 R_w$.

La variación de la resistencia del hilo con la temperatura es de la forma:

$$R_w = R_o \{1 + a(T_w - T_o) + a_1(T_w - T_o) + \dots\}$$

R_o resistencia a la temperatura de referencia T_o para platino
 $a = 3,5 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ $a_1 = -5,5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ viendo que $a \gg a_1$, pudiendo considerar la fórmula simplificada

$$R_w = R_g \{1 + a(T_w - T_g)\}$$

$$T_w - T_g = \frac{R_w - R_g}{aR_g}$$

R_g resistencia del hilo a la temperatura del gas.

Sustituyendo en la fórmula queda:

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_g} = \frac{\gamma \pi K L}{a R_g} \left[0,42 (\text{Pr})_f^{1/5} + 0,57 (\text{Pr})_f^{1/3} (\text{Re})_f^{1/2} \right]$$

$$\frac{I^2 R_w}{R_w - R_g} = A + B \sqrt{U}$$

γ factor de conversión

$$A = 0,42 \frac{\gamma \pi K L}{a R_g} (\text{Pr})_f^{1/5}$$

$$B = 0,57 \frac{\gamma \pi K L}{a R_g} (\text{Pr})_f^{1/3} \left(\frac{\rho_f D}{\mu_f} \right)^{1/2}$$

Para el método de temperatura constante los valores A y

B son constantes (fluido homogéneo), quedando una relación de la potencia en función de \sqrt{U} que es lineal.

En la práctica A y B no se calculan con las relaciones teóricas, determinándose experimentalmente. Las relaciones teóricas se utilizan para ver los efectos de las propiedades del gas y del hilo.

La Fig. 4-36 da la relación entre I^2 y \sqrt{U} para temperatura constante, obtenido experimentalmente, confirmándose la linealidad entre I^2 y \sqrt{U} . La calibración se hace en una corriente uniforme donde la turbulencia es mínima y la composición del gas homogénea.

Estos valores de A y B obtenidos en la calibración estática se consideran válidos para las medidas en un flujo turbulento, aunque hay diferencias que se desprecian en condiciones normales ocasionadas por el efecto no lineal de la temperatura sobre estas constantes.

Las fórmulas teóricas que dan A y B dependen de las propiedades del fluido, en el caso de una mezcla de dos gases, aire y combustible, las propiedades variarán según sea la composición, luego la sonda será sensible a las variaciones de composición. Las fórmulas empíricas de Kramer, Collis y William no predicen el calor disipado en mezclas gaseosas, debiéndose calcular en una calibración experimental.

Para sistemas heterogéneos el calor disipado dependerá de la composición y de la velocidad, quedando una relación

$$P = A(\rho, \mu, C_p, K, h\text{---}) + B(\rho, \mu, C_p, K, h\text{---})U^{1/2}$$

P potencia eléctrica

RELACION ENTRE I^2 Y \sqrt{U} PARA TEMPERATURA CONSTANTE.

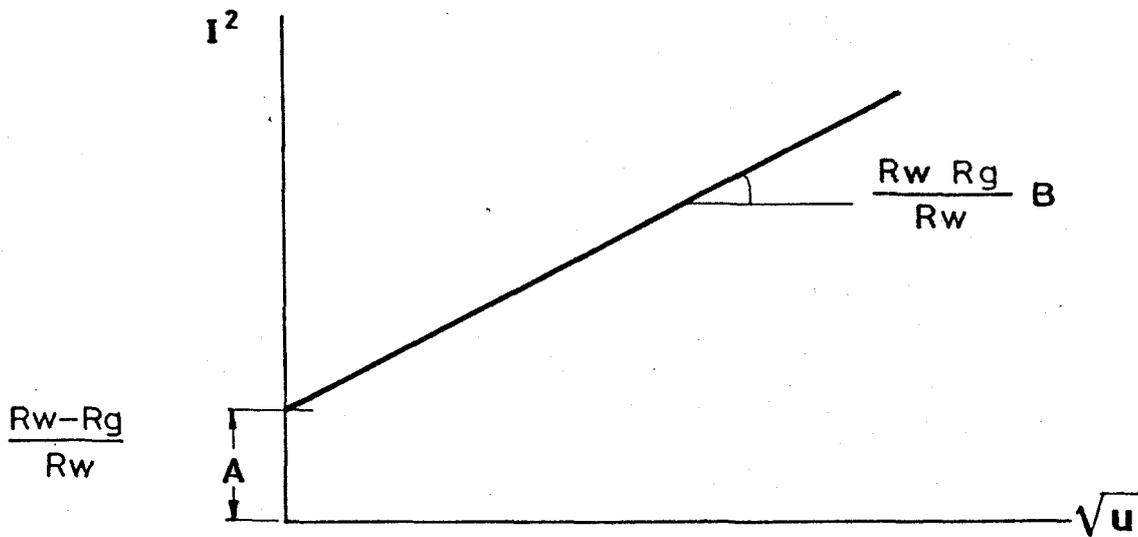


FIG. 4-36

En la cual A y B puede calcularse experimentalmente en función de la composición conocida la velocidad, pero al introducir la sonda en un medio donde no se conoce la concentración ni la velocidad, resulta que distintas parejas de valores de la concentración y velocidad pueden darnos el mismo calor disipado. Para soslayar este inconveniente se recurre a la aspiración de la muestra por una bomba de vacío a través de una garganta donde se alcanzan condiciones sónicas (Fig.4-37).

La velocidad en la garganta es la del sonido de valor

$$V_g = \gamma \frac{R}{M} T$$

R constante universal de los gases ideales

M peso molecular del gas

γ relación de los calores específicos

T temperatura

La ecuación de continuidad

$$A_g \rho_g V_g = A \rho U$$

A área en la sección de paso donde está el hilo caliente

A_g área de la garganta

ρ densidad en la sección donde está el hilo caliente

ρ_g densidad en la garganta.

La velocidad en el hilo
$$U = \frac{A_g}{A} \frac{\rho_g}{\rho} V_g$$

Sustituyendo

$$P = A + B \left(\frac{A_g \rho_g}{A \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma R T}{M} \right)^{1/4}$$

Expresión que sólo depende de la composición del gas, pero no es utilizada en la práctica, calculándose la relación

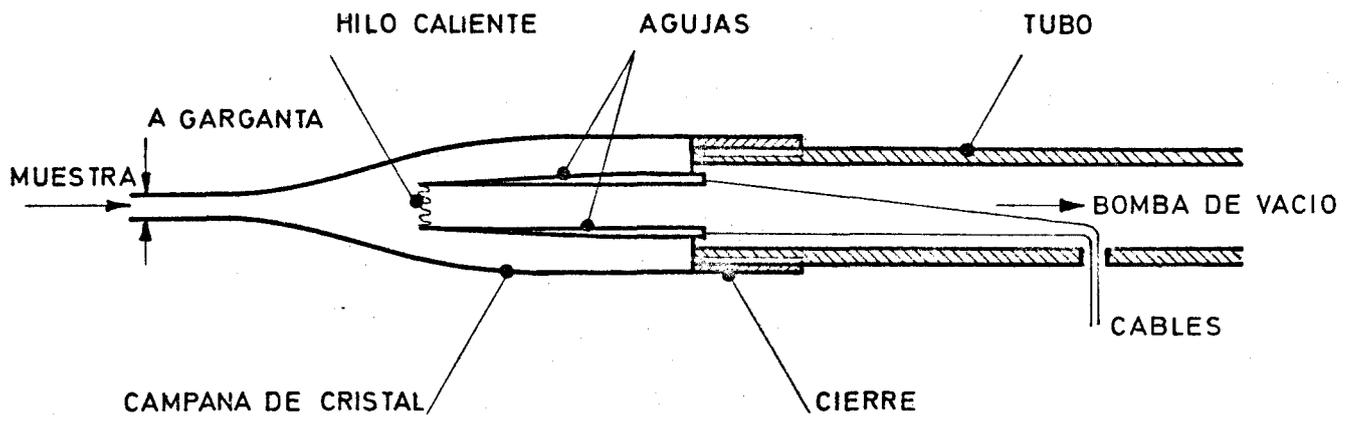


FIG. 4-37

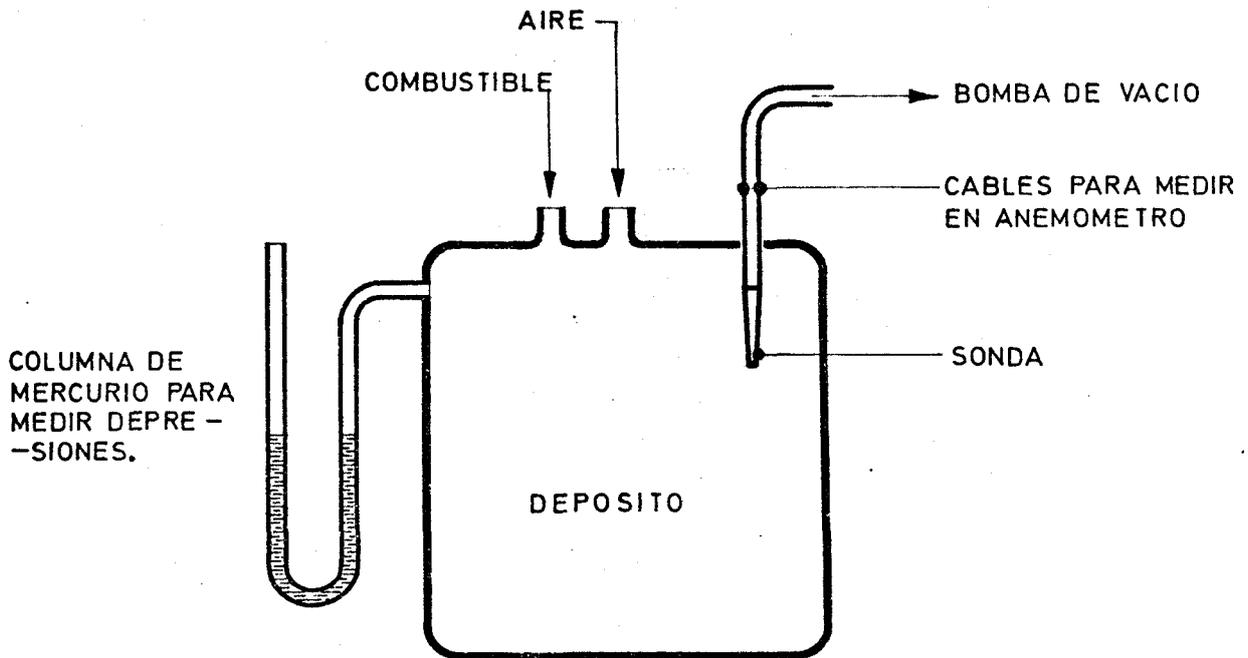


FIG. 4-38

entre el calor disipado y las distintas concentraciones experimentalmente.

TARADO DE LA SONDA

En un depósito se hacen las diferentes mezclas de butano y aire para el tarado de la sonda, ya que éste será el combustible empleado en la experimentación (Fig.4-38).

El método seguido es el siguiente, con el depósito lleno de aire a la presión y temperatura ambiente se produce la succión a través de la sonda del aire contenido en el depósito por medio de una bomba de vacío. El anemómetro DISA tipo 55D000 de temperatura constante nos da un voltaje E que es el necesario para que la resistencia del hilo caliente no varíe al pasar el aire por la sonda. Para la siguiente medida se cierran todas las entradas al depósito y se produce un vacío de unos 10 cm de mercurio que se miden con una columna de mercurio, se desconecta la bomba y se abre la válvula de butano hasta alcanzar la presión ambiente. sabiendo así el tanto por ciento de butano en aire que tenemos en el depósito, conectando de nuevo la bomba de vacío a través de la sonda hacemos otra medida con el anemómetro. Para la siguiente medida se tiene que limpiar el depósito de la mezcla anterior haciendo un vacío total y a continuación abrir las válvulas de aire y butano para hacer otra mezcla conocida que se medirá con el anemómetro. La última medida se realiza con el depósito lleno de butano a la presión y temperatura ambiente.

Haciendo varias medidas se obtiene una curva que da el voltaje E en función de distintas mezclas, dadas en tanto por ciento de butano en aire, Fig.4-38. Durante todo el experimento se asegura que las mezclas son perfectamente homogéneas, no

habiendo variaciones de concentración dentro del depósito.

MEDIDA DE LA RIQUEZA Y GRADO DE MEZCLA

Para comprender mejor la formación de los óxidos de nitrógeno en la cámara de combustión, los cuales dependen de las temperaturas locales en la cámara es necesario conocer la distribución de la riqueza así como el grado mezcla del aire/combustible, debido a que influyen sobre las temperaturas alcanzadas en la cámara.

Mediante la Fig.4-39 del tarado de la sonda se puede conocer la riqueza en cada punto de la cámara, al dar el anemómetro un voltaje E que corresponde a un tanto por ciento de combustible en aire.

Para la medida del grado de mezcla en la cámara, siempre que las variaciones sean pequeñas se tiene que la densidad del fluido ρ (que equivale a la medida de tanto por ciento de combustible en aire) viene dada por $\rho = \bar{\rho} + \rho'$.

$$\bar{\rho} = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} \rho dt$$

$$\frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} \rho' dt = 0$$

La curva de calibración da una función $E = f(\rho)$, considerando el caso en que $\rho' \ll \bar{\rho}$ se puede hacer la aproximación siguiente:

.....

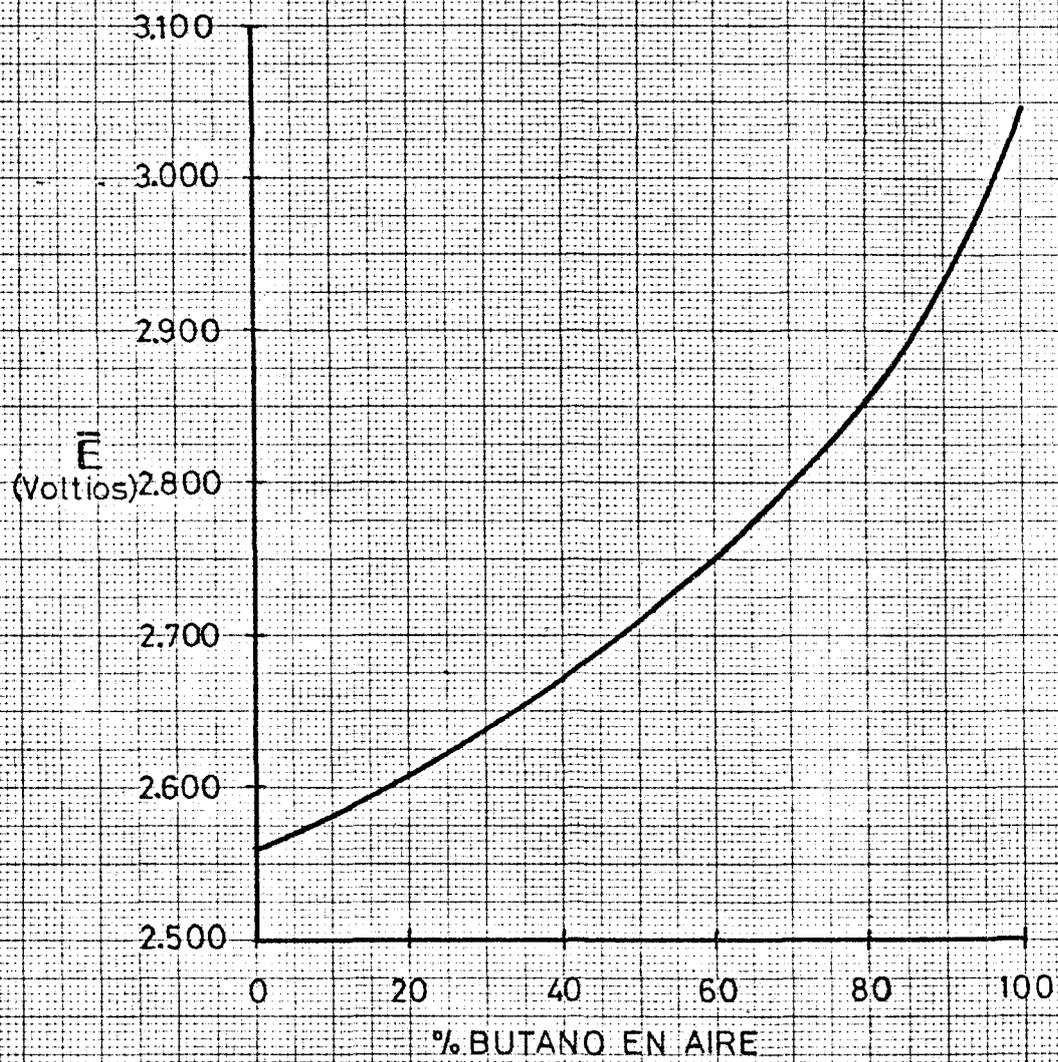


FIG. 4-39

$$E = \bar{E} + e' = f(\bar{\rho} + \rho') \approx f(\bar{\rho}) + \left(\frac{df}{d\rho}\right)_{\bar{\rho}} \cdot \rho'$$

$$\bar{E} = f(\bar{\rho})$$

$$e' = \left(\frac{df}{d\rho}\right)_{\bar{\rho}} \cdot \rho'$$

El valor de $\left(\frac{df}{d\rho}\right)_{\bar{\rho}}$ da la sensibilidad del hilo caliente, interesando que sea lo mayor posible este término.

Operando se tiene el valor de la raíz cuadrática media del voltaje

$$\sqrt{e'^2} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} e'^2 dt} = \left(\frac{df}{d\rho}\right)_{\bar{\rho}} \cdot \sqrt{\rho'^2}$$

La magnitud $\sqrt{\rho'^2}$ da la medida del grado de mezcla, cuyo valor se calcula conocidos los valores de $\sqrt{e'^2}$ dado por la unidad del anemómetro "Type 55D35 RMS Voltmeter" y $\left(\frac{df}{d\rho}\right)_{\bar{\rho}}$ por medio de la curva de calibración.

Referencias

- 4-106 HINZE, J.O. : "Turbulence"
Mc Graw-Hill.
- 4-107 ZAWACKI, T.S. : "Experimental Investigation of
and Turbulence in the Mixing Region
WEINSTEIN, H. Between Coaxial Streams"
NASA CR-959. Illinois Institute
of Technology.
- 4-108 BROWN, G.L. : "A Small, Fast-Response Probe to
and Measure Composition of a Binary
REBOLLO, M.R. Gas Mixture "
AIAA Mayo 1972, pp.649-652.
- - - - -

CAPITULO 5°

PROBLEMAS DE CONTAMINACION ATMOSFERICA ORIGINADA

EN FUENTES ESTACIONARIAS DE COMBUSTION

5. EFFECTOS DE CONTAMINACION ATMOSFERICA DERIVADOS DE LA COMBUSTION DE HIDROCARBUROS EN FUENTES ESTACIONARIAS DE COMBUSTION.

5.1. Las fuentes estacionarias de combustión, su incidencia en la contaminación atmosférica.

Bajo el nombre genérico de fuentes estacionarias de combustión o generadores de calor se incluyen la enorme variedad existente de instalaciones fijas cuya función es la obtención de energía térmica a partir de la combustión de un combustible, para su utilización directa en forma de calor o para su posterior transformación en energía mecánica o eléctrica. Comprende, por tanto, esta denominación a todas aquellas instalaciones cuya fuente primaria de potencia es la combustión de un combustible (hogares de centrales térmicas, refinerías, siderúrgicas, industria en general, calefacción doméstica, etc.).

Los combustibles empleados en los procesos de combustión varían según los tipos y usos de las instalaciones pero, en general, se reducen a diferentes tipos de combustibles fósiles más o menos refinados (carbones e hidrocarburos líquidos, gaseosos) además de cantidades comparativamente despreciables de otras materias orgánicas (madera, papel, etc.)

En virtud de la gran amplitud de aplicaciones de las

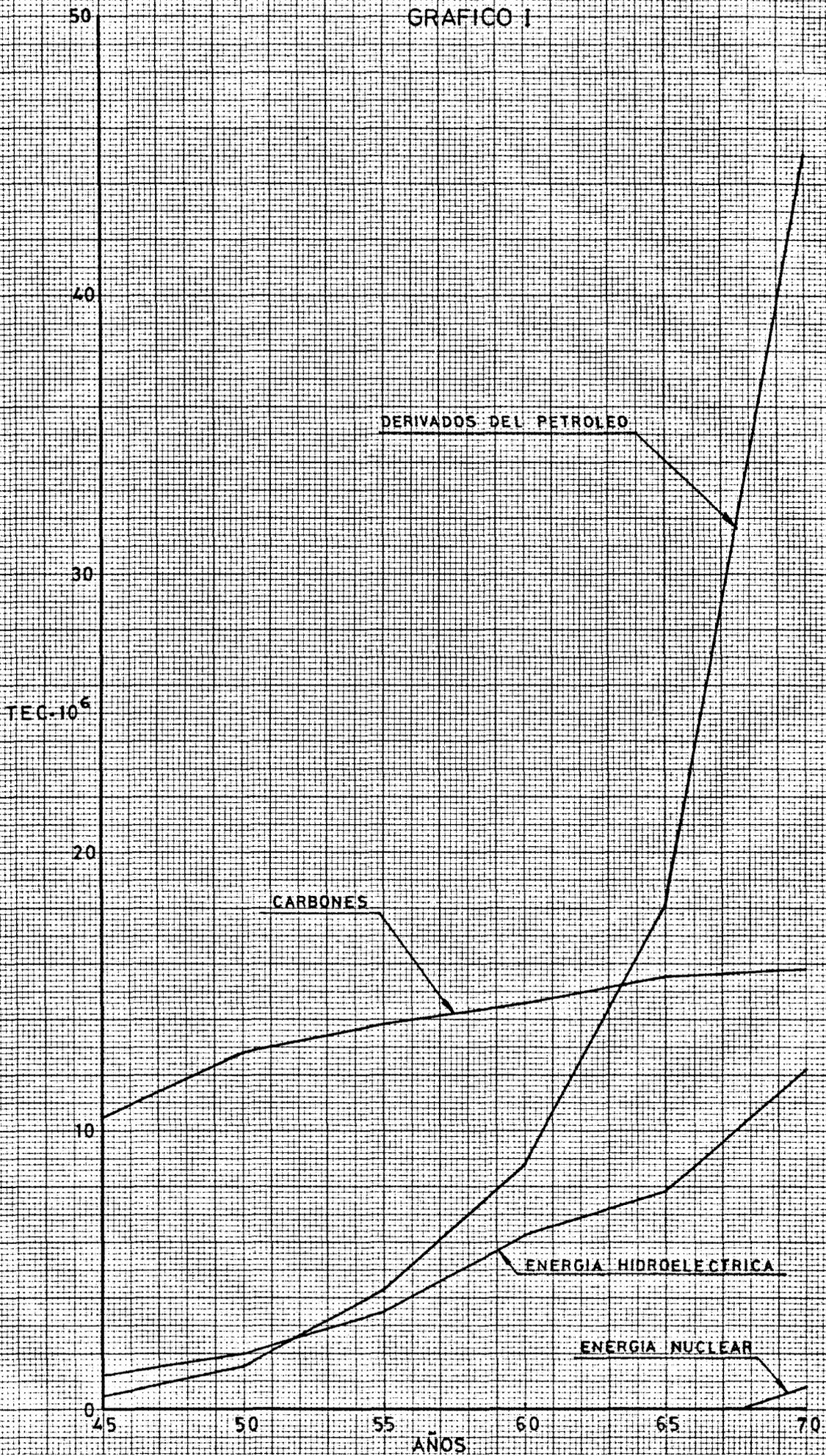
fuentes estacionarias de combustión el consumo global de combustibles en estas fuentes resulta considerablemente mayor que el de las fuentes móviles. Si se tiene en cuenta, además, que los combustibles empleados en fuentes fijas son, generalmente, menos refinados que los destinados a fuentes móviles, el volumen total de contaminantes eyectados a la atmósfera por las fuentes estacionarias resultará mayor que en las móviles, por lo que su contribución a la contaminación "global" de la atmósfera resultará igualmente mayor.

En el gráfico I se presenta la evolución del consumo interior neto de energías en España para el período 1945-1970 en el que se observa la clara preponderancia de las fuentes primarias de energía a base de combustión de combustibles fósiles (derivados del petróleo y carbonos). Es posible que la actual crisis petrolífera modifique marcadamente las derivadas de estas curvas en el quinquenio 1970-1975 pero debe esperarse que se mantenga al menos el predominio alcanzado por los derivados del petróleo.

En el gráfico II se presenta la evolución del consumo interior neto, para el mismo período, de los distintos tipos de derivados del petróleo en España, en el que se observa el predominio del consumo de productos pesados de empleo en fuentes fijas sobre los combustibles de fuentes móviles, de forma

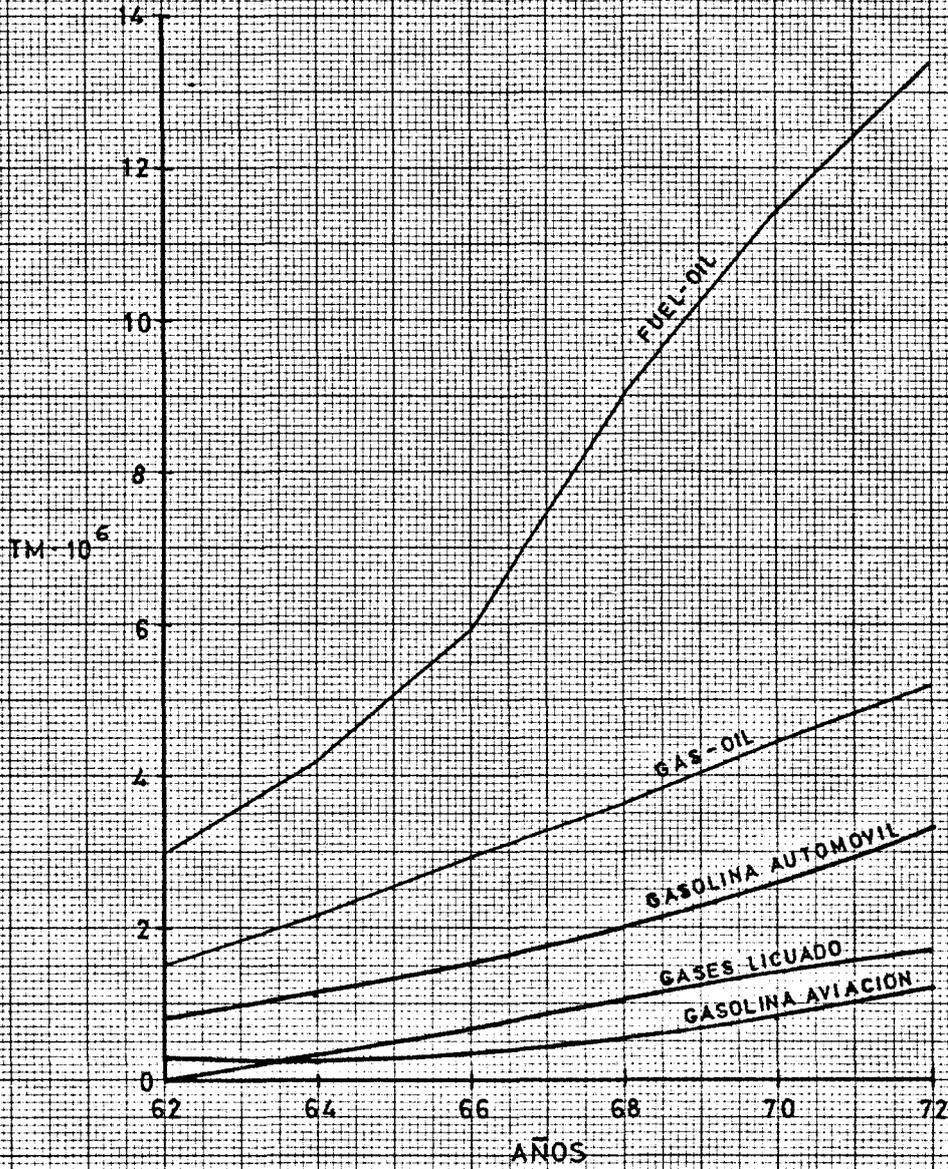
EVOLUCION DEL CONSUMO INTERIOR NETO DE ENERGIAS EN ESPAÑA

GRAFICO I



EVOLUCION DEL CONSUMO INTERIOR DE PRODUCTOS PETROLIFEROS EN ESPAÑA

GRAFICO II



que aún dejando aparte los carbones, la distribución de consumo de derivados del petróleo en fuentes fijas resulta del orden de tres veces superior al consumo en fuentes móviles.

Estas cifras justifican las razones expuestas anteriormente y evidencian la gran incidencia de las fuentes fijas de combustión en la contaminación atmosférica y el interés de estudiar las mismas para hacer mínimos sus efectos contaminantes.

Una primera clasificación de las fuentes fijas de combustión se puede establecer, en cuanto al tipo de combustible, en instalaciones que consumen carbón, e instalaciones alimentadas con derivados del petróleo. Como se ve en el gráfico I el consumo de carbón se mantiene prácticamente estacionario en los últimos años mientras que el de derivados del petróleo crece espectacularmente en el mismo período, esto se debe esencialmente al creciente precio del carbón como consecuencia del constante incremento de los precios de explotación de las minas, juntamente con el acelerado desarrollo de quemadores para combustibles líquidos y gaseosos con que se van dotando cada vez más instalaciones. Esta tendencia puede alterarse transitoriamente como consecuencia de la crisis petrolífera, pero puede esperarse que en un futuro próximo el carbón quede como combustible prácticamente específico de las grandes instalaciones fijas, (centrales térmicas, siderurgia, cokerías, ...

etc.), mientras que la mayoría de las otras instalaciones industriales y la calefacción doméstica se alimentará de combustibles líquidos y gaseosos.

Los problemas de contaminación de las grandes instalaciones que consumen carbón son muy específicos; ya que por ubicarse, generalmente, aisladas fuera de las grandes aglomeraciones urbanas sus efectos de contaminación tienen casi siempre un carácter de problema local: además, en su caso está económicamente justificado el empleo de métodos de control de la combustión muy elaborados incluyendo la instalación de sistemas específicos de depuración de los gases de salida. Por estas razones, en este estudio se prescindirá del análisis de dichas instalaciones enfocándose exclusivamente al estudio de las fuentes fijas funcionando con combustibles líquidos, que se consideran del máximo interés desde el punto de vista de la contaminación atmosférica por ser las más extendidas y las de mayor incidencia en la contaminación de núcleos industriales y urbanos. Obviamente, se prescindirá también del estudio de las plantas que consumen combustibles gaseosos ya que por ser este tipo de combustible esencialmente limpio, y el consumo actual comparativamente muy pequeño, será también muy reducida, por tanto, su incidencia en la contaminación atmosférica.

Aunque algunas instalaciones industriales por necesida-

des del proceso a que alimentan consumen combustibles ligeros éstos son casos de excepción, de forma que la generalidad de estas instalaciones consumen combustibles siempre pesados, los denominados fuel-oils, cuya composición y características específicas pueden variar mucho según el origen de los crudos y de los procesos de destilación y refino. Esta variabilidad en la composición de los fuel-oils ha llevado a una cierta anarquía en la clasificación internacional de tipos, ya que los diferentes países han adoptado tipos con especificaciones muy distintas, aunque siempre estableciendo las categorías esencialmente en cuanto a la viscosidad y al contenido máximo de azufre. Así dentro siempre de la aludida anarquía todos los países destinan los tipos más pesados y con mayor contenido en azufre a las actividades industriales, y los tipos más ligeros y con menor contenido de azufre a la calefacción doméstica, de modo que generalizando se pueden establecer dos grandes categorías; los fuel-oil industriales, y los fuel-oil domésticos.

La variabilidad de características de los fuel-oil tiene una importancia decisiva en los problemas de contaminación de este tipo de instalaciones, ya que una instalación regulada para un cierto tipo de fuel-oil específico, y que contamina poco cuando consume ese tipo de fuel, puede pasar a funcionar muy incorrectamente si se cambia el tipo de combustible sin

realizar las modificaciones óptimas en el sistema de alimentación y regulación. Esto evidencia el interés de definir muy concretamente las especificaciones de cada tipo y clasificar las instalaciones teniendo en cuenta los tipos de fuel que pueden consumir.

Todo el trabajo experimental llevado a cabo en el presente estudio se ha realizado con un combustible doméstico de viscosidad media tipo CAMPSA, sin embargo, dado el carácter general del estudio sus conclusiones son cualitativamente aplicables a la combustión de cualquier tipo de fuel-oil.

Considerando pues exclusivamente las fuentes fijas alimentadas con fuel-oil, se puede establecer una primera clasificación de los tipos de estas instalaciones en tres grandes sectores; centrales termoeléctricas, otras instalaciones industriales, y calefacción doméstica. Los consumos de fuel-oil en estos sectores durante el año 1971 en España (I) han sido de 3.380.000 Tm para las centrales térmicas, 7.387.129 Tm para las actividades industriales y 772.000 Tm en la calefacción doméstica. A la vista de estas cifras podría parecer que el sector de la calefacción doméstica carece de importancia relativa, sin embargo, su marcada aglomeración en los grandes centros urbanos y su carácter estacional les da el máximo grado de importancia en la contaminación del aire de las ciudades.

5.2 Contaminantes típicos de las fuentes fijas

Los contaminantes típicos de las fuentes estacionarias de combustión son bien conocidos ya que son los que se presentan en toda combustión de un hidrocarburo en aire, estando lógicamente definidas sus concentraciones en la emisión en función de las características del combustible empleado, de la forma de realizarse la combustión y de la eficiencia de los mecanismos de depuración que pueden estar previstos en el sistema de eyección de gases.

En general, como contaminantes típicos de este tipo de instalaciones se encuentran por orden de importancia, en primer lugar, los hollines, también conocidos bajo la denominación de humos, y que estén formados por aglomeraciones de partículas sólidas y líquidas procedentes de combustión incompleta de hidrocarburos o impurezas no combustibles contenidas en el fuel-oil. Estas aglomeraciones pueden contener condensaciones de vapor de agua de la combustión con una cierta proporción de ácido sulfúrico formado a partir del anhídrido sulfúrico (SO_3), que aunque en concentraciones mucho menores que las de anhídrido sulfuroso (SO_2) aparece siempre en la combustión de combustibles que contengan azufre. Si bien los hollines aún neutros son de por sí contaminantes poco deseables por contribuir al ensuciamiento del ambiente provocando, además, defectos de vi-

sibilidad, cuando su contenido ácido es importante sus efectos indeseables se incrementan considerablemente ya que entonces resultan altamente corrosivos para la propia instalación y sus espacios circundantes y muy tóxicos para los seres vivos.

La formación de hollines está muy íntimamente ligada a la forma de realizarse la combustión en el hogar (pulverización del combustible, buen aporte y mezclado del aire, volumen suficiente del hogar, buena estructura de la llama, etc.) de forma que la concentración de inquemados a la salida del hogar se minimiza con quemadores bien resueltos y combustiones bien reguladas. Además de la correcta combustión, los hollines se pueden retener antes de la emisión de gas al ambiente mediante la instalación de sistemas convencionales de depuración en chimenea.

El segundo contaminante en orden de importancia es el anhídrido sulfuroso (SO_2) que como se citó anteriormente se presenta por oxidación del azufre contenido en el combustible durante la combustión. A diferencia de lo que ocurría con los hollines, la concentración de SO_2 en la emisión no está condicionada por la calidad de la combustión, sino simplemente por el contenido en azufre del combustible, ya que durante la combustión prácticamente todo el azufre del combustible se invierte en la formación de SO_2 . Además, excepto para instalaciones

de muy grandes potencias no existe procedimiento desarrollado económicamente razonable para la depuración en chimenea. Por tanto, la única fórmula actual para obtener índices de SO_2 pequeños en la emisión, es la utilización de combustibles de bajo índice de azufre. Por estas razones no se ha tratado en este estudio de analizar los mecanismos de formación de SO_2 , si bien en las exploraciones del hogar se ha medido también la distribución de su concentración porque estas medidas contribuyen a conocer el desarrollo general de las reacciones en la zona de combustión.

El tercer contaminante típico de las fuentes estacionarias de combustión son los óxidos de nitrógeno, NO_x que en la emisión aparecen esencialmente como NO con proporciones muy pequeñas de NO_2 .

Como se ha dicho, los óxidos de nitrógeno se forman por oxidación a alta temperatura del nitrógeno del aire. La formación de óxidos de nitrógeno tampoco está directamente relacionada con la calidad de la combustión sino con la presencia de altas temperaturas en el hogar, (las cuales pueden ser necesarias para el mantenimiento de una buena calidad de la combustión), y el mecanismo de su formación no está actualmente bien conocido. Al estudio experimental de la formación de los óxidos de nitrógeno en este tipo de instalaciones se ha dedicado

una parte esencial en el presente trabajo.

Como otros contaminantes típicos de este tipo de instalaciones se deben contar el CO, y los hidrocarburos no quemados en fase gaseosa. Ambos son productos de combustión incompleta y, por tanto, directamente relacionados con la calidad de combustión. Sin embargo, sus concentraciones usuales son muy pequeñas comparadas con los porcentajes en otros tipos de fuentes (por ejemplo, en vehículos), ya que estas instalaciones funcionan siempre con excesos de aire relativamente grandes y tiempos de residencia importantes para conseguir una oxidación casi completa de los gases combustibles. No obstante, en la exploración del hogar realizada en el presente trabajo se han analizado también ambos contaminantes, tanto por el gran interés que tiene poner a punto las técnicas de análisis, como por el de conocer los mecanismos de formación de estos contaminantes; conocimiento a partir del cual se pueden obtener criterios para el correcto dimensionado de quemadores y hogares.

5.3. Los componentes esenciales de las fuentes fijas de combustible líquido. Definición de un modelo de planta.

A pesar de las grandes diferencias en cuanto a ordenes de potencias consumidas y tamaños y formas de las instalaciones tipos de combustibles y mecanismos de combustión de las

distintas fuentes fijas, los componentes fundamentales de todas éstas son básicamente los mismos.

Los componentes que conviene diferenciar son los siguientes:

1°) Un sistema de alimentación de aire para el aporte del oxígeno necesario a la zona de combustión, que, generalmente, incluye un mecanismo impulsor para el tiro forzado.

2°) Un sistema más o menos complejo de aporte, dosificación y distribución de combustible a la zona de combustión.

3°) Un hogar o cámara de combustión en cuyo interior tienen lugar los procesos de vaporización y mezclado del combustible en el aire y las reacciones de combustión, manteniéndose así en el núcleo de la zona de reacción permanentemente una región de alta temperatura. Todos estos procesos tienen lugar de forma continua a una presión casi constante y vecina de la presión atmosférica, manteniéndose así una zona de reacción estable que, generalmente, tiene la estructura típica de una llama de difusión. La forma en que se desarrolla la combustión en el hogar varía fuertemente según las características del hogar y el tipo de quemador. El estudio detallado de estas condiciones en cada caso será de la máxima importancia desde el punto de vista de la contaminación ya que es a lo largo de este proceso cuando tiene lugar la formación de contaminantes. La ma-

yor parte del contenido del presente trabajo se dedicará al análisis de las condiciones de combustión en el hogar, encaminadas a la determinación de los parámetros esenciales que intervienen en la formación de contaminantes.

4°) Un sistema intercambiador de calor como medio de transporte de la energía térmica de los productos de combustión a la utilización. Las paredes del sistema intercambiador pueden estar más o menos próximas al hogar e incluso pueden ser parte integrante del mismo, de modo que según los casos en la transmisión de calor intervendrán en distinto grado los mecanismos de conducción, convección y radiación térmicas.

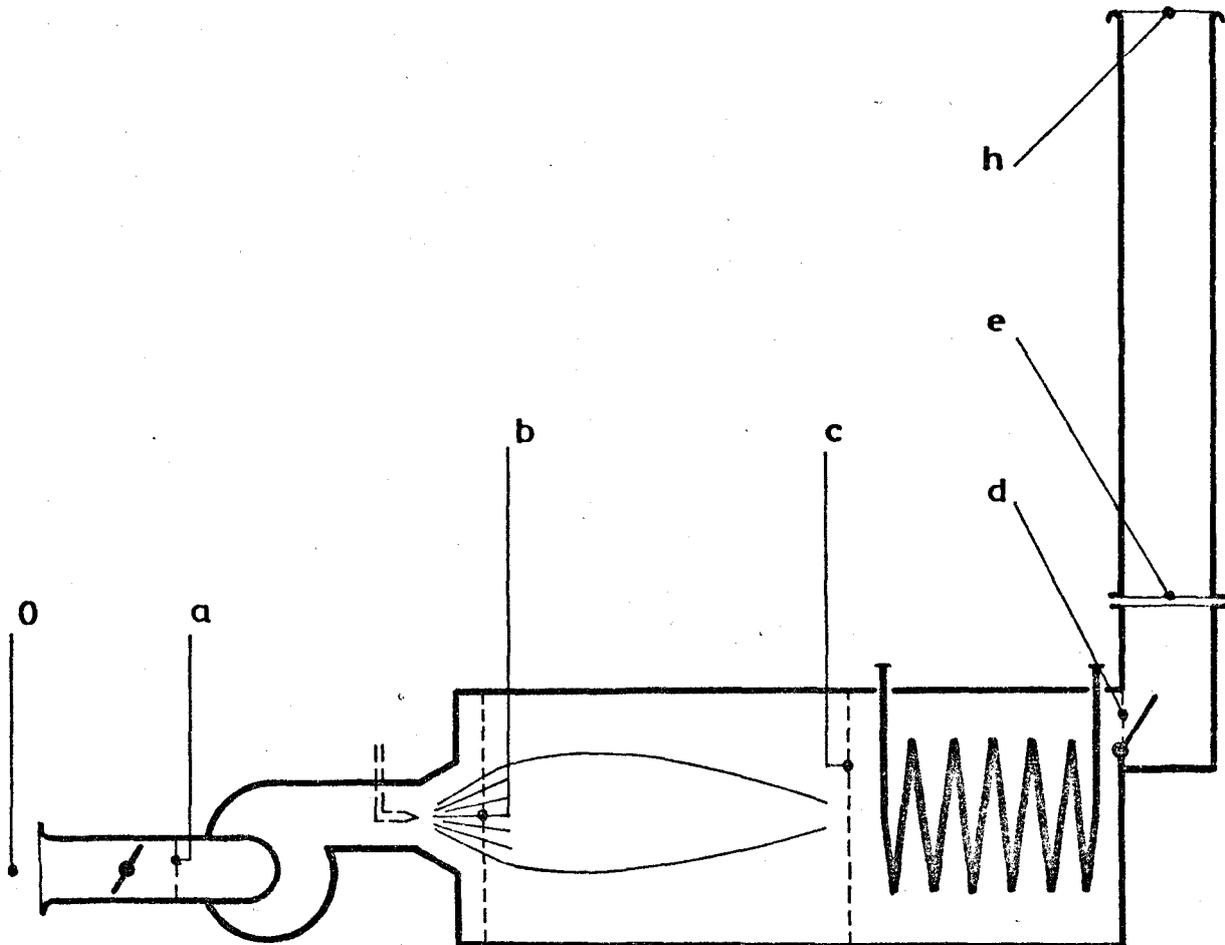
Debido a los efectos que la transmisión de calor puede tener sobre la temperatura de la zona de reacción, estos fenómenos pueden afectar muy fuertemente a la formación de contaminantes; bien por la modificación de las condiciones de contorno de la combustión cuando el cambiador forma parte del hogar, o por la aparición de reacciones de recombinación de los productos cuando la presencia del cambiador a la salida de la cámara supone una región de enfriamiento brusco de los gases que mados.

5°) Un sistema colector de los gases procedentes del cambiador de calor que finaliza con la emisión de los mismos al ambiente. Este componente tiene también una importancia deci-

siva en las características contaminantes de la planta por la posibilidad de incluir en el mismo sistemas de depuración por retención de contaminantes, y por su contribución a la adecuada dispersión de los contaminantes no retenidos.

En la literatura especializada en temas de combustión y contaminación se encuentran multitud de trabajos destinados al estudio de los diversos componentes enumerados que incluso definen modelos físicos de dichos componentes para analizar los efectos específicos de los parámetros característicos de cada componente aislado. Sin embargo, no se conoce ningún trabajo que haya abordado un modelo de planta en el que se considere el funcionamiento acoplado de todos los componentes y la definición de los parámetros esenciales del conjunto. En este estudio vamos a establecer un modelo esquemático del conjunto de una fuente fija de combustión considerando los componentes enumerados anteriormente. Este modelo se ha representado en la figura 5.1 en la que se fijan las estaciones que definen el principio y final de cada proceso fundamental.

El número de variables que definen completamente este modelo resultaría enorme, entre ellas se incluyen forma y dimensiones geométricas de todos los componentes, condiciones ambientales a la entrada, posición de los dispositivos de regulación, régimen del ventilador, tipo de fuel-oil, caudal, presión y temperatura de inyección, características del campo flui



ESTACIONES

- 0) Condiciones ambientes al nivel del suelo.
- a) Condiciones a la entrada del ventilador del quemador.
- b) Entrada de aire al hogar.
- c) Fin de la combustión supuesta adiabática.

Fig.5.1

do en el hogar, caudal y temperatura del refrigerante, condiciones atmosféricas a la salida de chimenea, etc. Para su simplificación se admite que todas las dimensiones geométricas son constantes excepto la posición de los dispositivos de regulación, que el movimiento de los fluidos se puede tratar como unidimensional y estacionario, que la regulación del combustible mantiene un caudal de fuel constante con el tiempo y una pulverización dando una distribución espacial en el hogar también constante, y que la altura del hogar es despreciable frente a la de la chimenea.

Todas estas hipótesis pueden admitirse cuando se trata de estudiar una planta definida, con un hogar determinado equipado con un quemador también determinado.

La formación de contaminantes en una planta que obedece a este modelo tendrá lugar esencialmente en los procesos que se desarrollen en la cámara de combustión y en el enfriamiento (posterior o simultáneo) en el cambiador de calor, pero las condiciones en estos procesos están influenciadas por los efectos del resto de los componentes de la instalación ya que la configuración y condiciones de regulación de todos los componentes contribuye a fijar el gasto de aire.

Para un hogar de configuración determinada, equipado con un quemador también determinado, el caudal de combustible

y la distribución espacial del mismo en el hogar vienen fijadas por las características del sistema de inyección, y por la configuración del movimiento del aire en el hogar.

En estas condiciones el parámetro que mayor influencia tiene en la forma de realizarse la combustión en el hogar es la relación media aire-combustible que estará definido por el gasto global de aire en la cámara, por lo que las variaciones incontroladas del citado gasto de aire modifican las condiciones de regulación de la instalación y, en consecuencia, sus efectos contaminantes.

Por estas razones resulta especialmente interesante estudiar como "respira" una instalación de este tipo y determinar los parámetros esenciales de que depende el gasto de aire.

En el diagrama TS de la Fig.5.2 se representa la evolución de las condiciones estáticas medias de la corriente a lo largo de la instalación suponiendo que solamente circula aire por la instalación y asimilando la combustión a una adición de calor sin cambio de composición.

El proceso o-a representa la evolución del aire desde el ambiente hasta la entrada del ventilador del quemador. Este proceso puede considerarse esencialmente adiabático (excepto en instalaciones de ciclo regenerativo), el cual lleva asociadas las pérdidas de presión por fricción correspondiente al

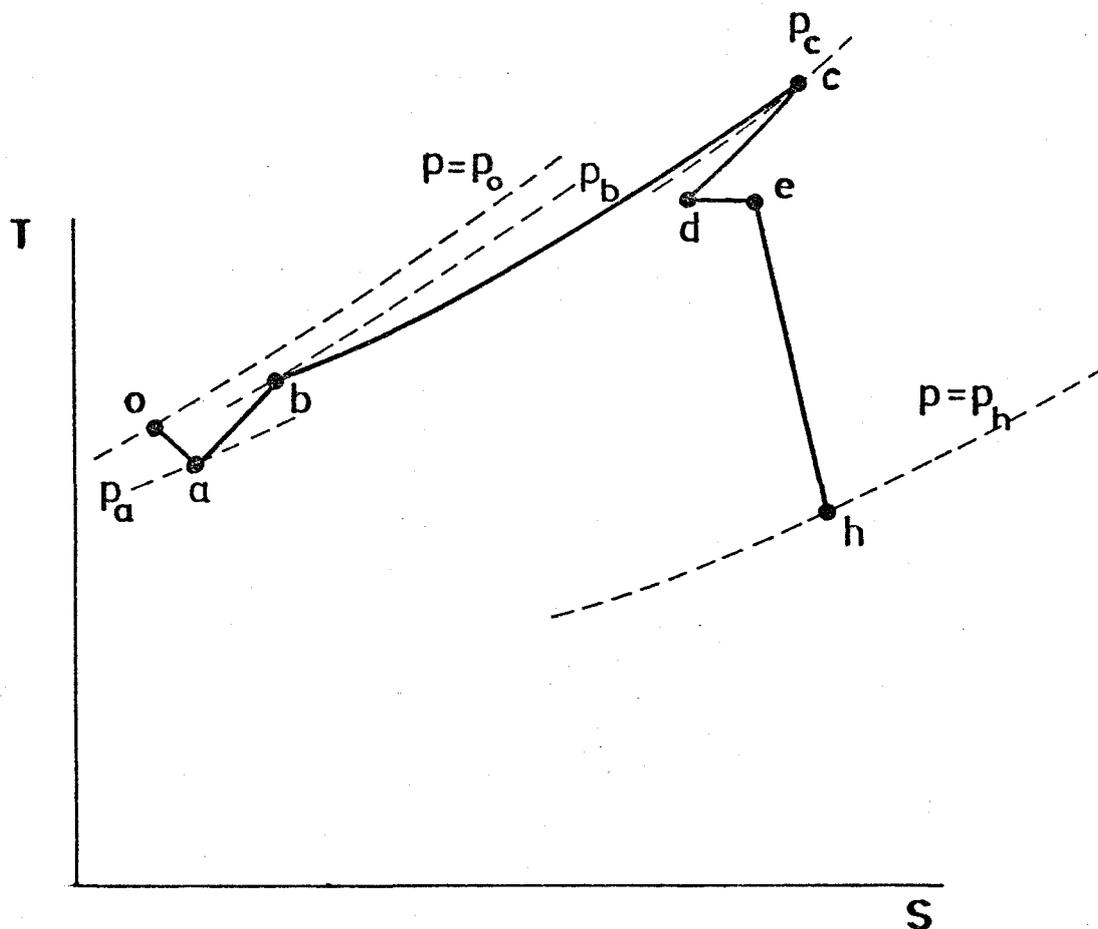


Fig.5.2

paso del aire hasta el cuarto de calderas, más las provocadas por el dispositivo de regulación de aire de entrada al quemador. La necesidad de minimizar las pérdidas de presión a través de la alimentación de aire al cuarto de calderas obligará al adecuado dimensionamiento de estos accesos de aire.

La pérdida de presión correspondiente a este proceso se podrá expresar con una función del tipo

$$\Delta P_{o-a} = P_o - P_a = f(R_1) \cdot G^2 \quad (5-1)$$

donde, $f(R_1)$ es una función de la posición del mando de regulación de aire (R_1); y G es el gasto en peso de aire que entra en la instalación.

El proceso a-b representa la acción del ventilador del quemador sobre la corriente de aire. Generalmente, el salto de presión estática en este tipo de ventiladores es muy pequeña, (excepto en el caso poco común de hogares sobrepresionados), de forma que su presión de salida es inferior a la atmosférica y, por tanto, el hogar se encuentra en depresión. Así resulta que el efecto esencial del ventilador es provocar una corriente de aire de cierta velocidad concentrada alrededor del inyector a la entrada del hogar apto para conseguir una distribución apropiada de la corriente en la zona de estabilización de llama y un campo de velocidades adecuado a la forma del hogar, y con elevada turbulencia.

La ganancia de presión estática en este proceso puede expresarse como una función del gasto, (característica del ventilador), que, generalmente, tiene la forma representada en la Fig.5.3.

$$\Delta P_{a-b} = P_b - P_a = f_v(G) \quad (5-2)$$

El proceso b-c representa la serie de evoluciones que tienen lugar

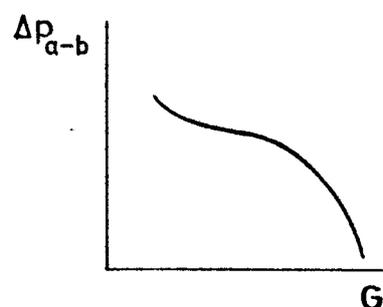


Fig.5.3

en la cámara de combustión y lleva asociadas las pérdidas de presión debidas a la fricción y la adición de calor. En este tipo de hogares las pérdidas de presión debidas a la adición de calor son pequeñas frente a las debidas a la fricción, de forma que las pérdidas de presión en este proceso pueden aproximarse con una expresión de la forma:

$$\Delta P_{b-c} = P_b - P_c = K_{b-c} \cdot G^2 \quad (5-3)$$

Donde K_{b-c} es una constante que depende de la configuración geométrica del hogar y de los dispositivos de estabilización de llama del quemador.

En el proceso c-d tiene lugar una disminución de la entropía de los gases como consecuencia del enfriamiento, y este proceso lleva asociadas unas pérdidas de presión por fricción que admiten una expresión del tipo:

$$\Delta P_{c-d} = P_c - P_d = K_{c-d} \cdot G^2 \quad (5-4)$$

donde K_{c-d} es una constante que depende de la geometría del cambiador de calor.

El proceso d-e es esencialmente adiabático y lleva asociadas las pérdidas por fricción en caja de humos y mecanismo de regulación del tiro, que admite igualmente una expresión del tipo

$$\Delta P_{d-e} = f(R_2) \cdot G^2 \quad (5-5)$$

donde $f(R_2)$ es una función de la posición del mando del dispositivo regulador de tiro (R_2).

El proceso e-h, representa la evolución de los gases en la chimenea que en este primer estudio supondremos adiabática y a lo largo de la cual, la presión cae hasta la presión ambiente a la altura h.

Consideremos el esquema de chimenea representado en la Fig.5.4.

La ecuación del impulso para movimiento unidimensional y estacionario se expresa:

$$P_e \cdot A_e - P_h \cdot A_h - F_{\epsilon_z} - F_{P_z} - W = \frac{G}{g} (V_h - V_e) \quad (5-6)$$

Donde:

P = Presión estática.

A = Area de la sección recta = $\pi \frac{D^2}{4}$.

V = Velocidad de los gases.

F_{ϵ_z} = Resultante de las fuerzas de fricción con las paredes en el sentido $F_{\epsilon_z} = \int_0^L \lambda \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 \frac{A}{D} dz$.

F_{P_z} = Resultante de las fuerzas de presión de las paredes en el sentido z. $F_{P_z} = \int_0^L P \sin \theta \pi D dz$.

W = El peso de la columna de gas contenido en la chimenea

$$W = \int_0^L \rho g A dz.$$

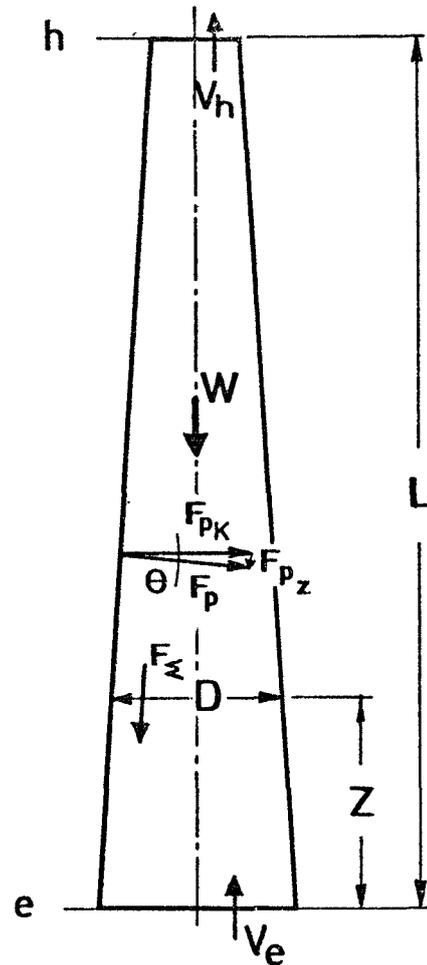


Fig.5.4

Para integrar estas expresiones es necesario conocer, $D = f(z)$; $P = f(z)$; $\rho = f(z)$. La sección interior de las chimeneas varía muy poco en los casos prácticos de forma que se puede considerar un diámetro medio constante. En este caso: $A_e = A_h = A$; $\theta = 0$; $F_{pz} = 0$; y suponiendo que la densidad es constante e igual a la densidad media; $\rho = \bar{\rho}$; se tendrá $V_h = V_e = \bar{V}$ y la ecuación (5-6) se reduce a:

$$(P_e - P_h) - \lambda \cdot \frac{1}{2} \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{V}^2 \cdot \frac{L}{D} - \bar{\rho} \cdot g \cdot L = 0$$

y haciendo $\lambda \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{V}^2 \cdot \frac{L}{D} = K_{e-h} \cdot G^2$

Se tiene:

$$P_e - P_h = K_{e-h} \cdot G^2 + \bar{\rho} \cdot g \cdot L \quad (5-7)$$

Considerando ahora la atmósfera exterior en calma se tendría

$$P_o - P_h = \int_0^h \rho_o \cdot g \cdot dz = \bar{\rho}_o \cdot g \cdot L \quad (5-8)$$

siendo ρ_o la densidad del aire ambiente a la altura z , y $\bar{\rho}_o$ la densidad media del aire entre 0 y L .

Por otra parte:

$$\begin{aligned} P_o - P_e &= \Delta P_{o-a} - \Delta P_{a-b} + \Delta P_{b-c} + \Delta P_{c-d} + \Delta P_{d-e} \\ &= f(R_1) \cdot G^2 - f_v(G) + K_{b-c} \cdot G^2 + K_{c-d} \cdot G^2 + f(R_2) \cdot G^2 \end{aligned} \quad (5-9)$$

Restando (5-7) de (5-8)

$$P_o - P_e = \bar{\rho}_o \cdot gL - K_{e-h} \cdot G^2 - \bar{\rho} \cdot gL \quad (5-10)$$

Igualando con (5-9)

$$(\bar{\rho}_o - \bar{\rho}) \cdot gL + f_v(G) = \left[f(R_1) + f(R_2) + K_{b-c} + K_{c-d} + K_{e-h} \right] \cdot G^2 \quad (5-11)$$

Que puede ponerse en la forma:

$$(\bar{p}_o - \bar{p}) gL + f_v(G) = (\Sigma f(R_1) + \Sigma K_{i-j}) \cdot G^2. \quad (5-12)$$

Expresión que define el gasto de aire a través de la instalación en condiciones estacionarias, como aquel valor del gasto para el cual el efecto de convección de la chimenea más el salto de presión del ventilador igualan a las pérdidas de carga en los dispositivos de regulación y en el resto de los componentes.

En la Fig.5.5 se ha representado la configuración típica

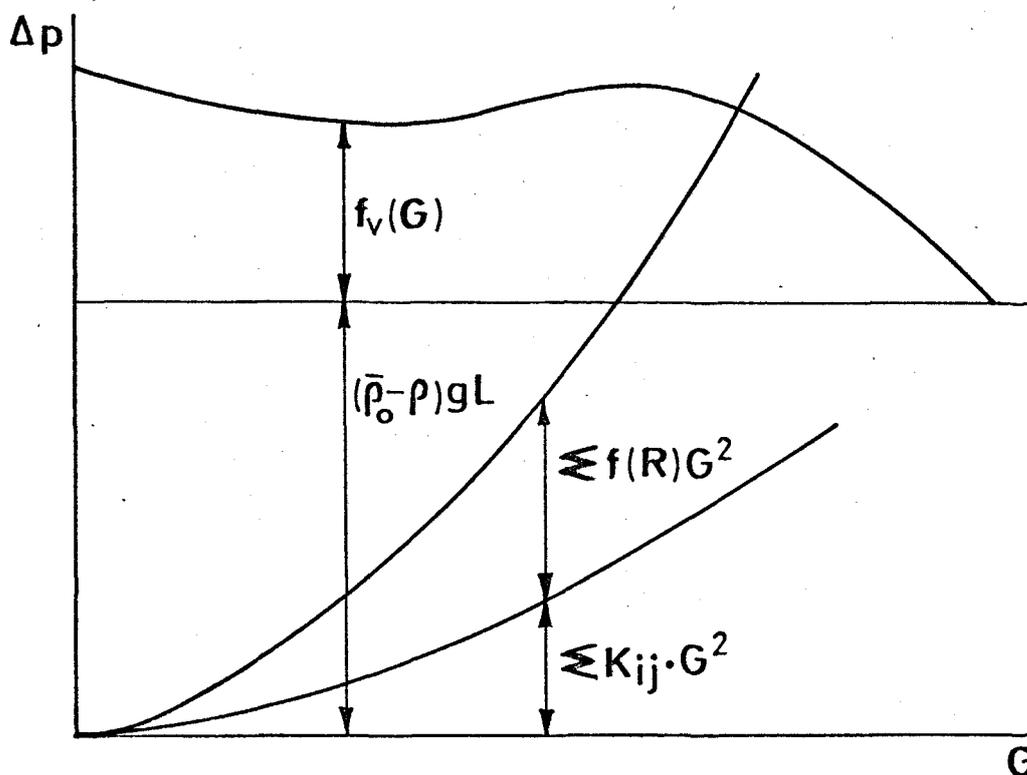


Fig.5.5

ca de los términos de la expresión (5-12) en función del gasto de aire, que definen el gasto de funcionamiento para unos valores dados de las condiciones ambiente ($\bar{\rho}_0$), posición de los dispositivos de regulación $E_f(R)$ y temperatura de los gases en la chimenea ($\bar{\rho}$).

En este gráfico se evidencian las variables esenciales que afectan a determinar el gasto de aire en este tipo de instalaciones. Como se ha indicado anteriormente estas instalaciones funcionan con un caudal de combustible constante una vez regulada una presión de inyección. El parámetro que más influye en la regulación de una instalación determinada a través de sus condiciones de combustión es la relación aire/combustible. Siendo el caudal de combustible constante, las modificaciones del caudal de aire varían la citada relación y, por tanto, afectan fuertemente a la emisión de contaminantes. El estudio de los parámetros que intervienen en las variaciones del gasto de aire es entonces importante desde el punto de vista de sus efectos en las emisiones, y para la definición de los métodos que conducen a condiciones óptimas de regulación.

La relación aire/combustible nominal en este tipo de instalaciones varía de unas instalaciones a otras en el margen $1,15 \leq \lambda_n \leq 2$ siendo λ_n el valor de la relación del gasto de aire nominal al gasto de aire estequiométrico y correspondien-

do los valores más bajos a instalaciones de tecnología más depurada que se encuentran, en general, en las de orden de potencias más elevadas.

El valor del gasto de aire nominal será dato de partida fundamental en el diseño de una instalación de este tipo. Este valor será proporcionado por el fabricante del conjunto quemador-hogar para la potencia nominal de la planta. Tomando una posición media de los órganos de regulación y a partir de la configuración geométrica de los componentes se puede estimar la curva (A) de pérdidas de carga, superponiendo la característica del ventilador (B) se obtiene el efecto de convección deseado en la chimenea a partir del cual se definiría la altura mínima de chimenea necesaria para conseguir el gasto nominal, estimado un salto de densidad del aire del exterior a los gases de chimenea. En la mayoría de los casos la altura de la chimenea estará definida por la altura del edificio o por la necesidad de conseguir altura suficiente para la dispersión apropiada de los humos de forma que la longitud calculada a partir del método basado en la Fig.5.5 debe considerarse como la longitud mínima de chimenea necesaria desde el punto de vista de correcto funcionamiento de la planta en la época más cálida de su período probable de funcionamiento.

Además de los criterios de diseño que aporta, la Fig.5.5 conduce a algunas conclusiones interesantes.

Como se justificará más adelante la emisión de contaminantes aumenta para gastos de aire superiores o inferiores al de óptima de regulación (que en una planta bien diseñada coincidirá con el nominal), pero el aumento de los valores de emisión es particularmente importante a valores del gasto inferiores al citado.

Los efectos que tienden a disminuir el gasto de aire para una presión dada de los dispositivos de regulación son los siguientes:

Cenizas y depósitos de carbonilla formados en las paredes del hogar, cambiador de calor y conductos de evacuación que al reducir las superficies de paso elevan el valor de ΣK_{ij} y que pueden llegar a ser importantes en instalaciones mal mantenidas.

Funcionamiento del ventilador incorrecto reflejado en una caída en su curva característica provocada por desgaste o ensuciamiento consecuencia también de mal mantenimiento.

Entradas intersticiales de aire a través de los acoplamientos al hogar cambiador o conductos de evacuación, típicas igualmente de incorrecto mantenimiento o montaje defectuoso de la instalación. Estas entradas intersticiales de aire son especialmente perjudiciales porque contribuyen con tres efectos negativos:

1º) Aumentan las pérdidas de carga en la instalación.

2º) En su dilución con los humos disminuyen la temperatura de los mismos aminorando así el efecto de convección en la chimenea.

3º) Proporcionan valores de la concentración de CO_2 en los humos inferiores a los que realmente existen en la zona de combustión, lo que proporciona datos erróneos para el correcto ajuste de la relación aire/combustible, que como se verá más adelante se basa en la medida del CO_2 en los humos.

Aún siendo tan perjudiciales estas tomas intersticiales, se tienen datos prácticos que evidencian su presencia en una proporción considerable de las instalaciones existentes en la actualidad. Estos efectos merecen la debida atención, por lo que se considera que en la reglamentación sobre las instalaciones se debería incluir la obligatoriedad de verificar con garantía suficiente la estanqueidad de todo el circuito de humos.

Otro efecto que disminuye el gasto de aire es el enfriamiento de los humos como consecuencia del montaje de chimeneas con insuficiente aislamiento térmico, o por ser exageradamente baja la temperatura del cambiador de calor. El enfriamiento de los humos baja el efecto de convección en la chimenea por disminuir el término $(\bar{\rho}_o - \bar{\rho})gL$.

Las variaciones de las condiciones ambientes afectan

igualmente al funcionamiento de la instalación de forma que disminuye el efecto de convección $(\bar{\rho}_0 - \bar{\rho})gL$, cuando disminuye $\bar{\rho}_0$ lo que se dará en los casos de baja presión y temperatura ambiente elevada. Por este motivo para el cálculo de la longitud mínima de chimenea se considerarán las condiciones ambientales más desfavorables; es decir, los correspondientes al día de máxima temperatura y mínima presión que puede razonablemente esperarse dentro del período estacional de funcionamiento de la planta. La presencia de vientos afectará igualmente disminuyendo el gasto de aire cuando el efecto del viento se transforme en una contrapresión a la salida de chimenea, que puede dar lugar incluso a situaciones de tiro invertido. Para evitar este efecto se utilizarán protectores e incluso en algunos casos extractores en salida de chimenea, y existen recomendaciones de construcción contra la proximidad de obstáculos a cota superior a la de salida de la chimenea que pueden provocar contrapresión en ciertas condiciones de viento.

Todo lo anterior evidencia la gran cantidad de variables que afectan al funcionamiento de estas instalaciones simplemente en cuanto a su alimentación de aire y la diversidad de efectos que pueden presentarse para modificar su régimen de funcionamiento y, por tanto, no emisión de contaminantes.

Para minimizar entonces la eyección de contaminantes en instalaciones de este tipo, será necesario definir un método

de reglaje racional para conseguir condiciones óptimas, y una vez determinadas éstas dotar a la instalación de un sistema de regulación capaz de protegerle de las variaciones de las influencias exteriores, y llevar a cabo un mantenimiento de toda la planta que garantice su correcto funcionamiento permanentemente.

5.4 Efectos de contaminación durante las condiciones transitorias.

El modelo establecido en el apartado anterior para condiciones estacionarias puede ser utilizado para su aplicación al análisis de los efectos contaminantes durante períodos de funcionamiento transitorio. El funcionamiento transitorio se presenta durante el intervalo que sigue a la variación más o menos brusca de cualquiera de los parámetros de regulación hasta que se vuelven a alcanzar valores estacionarios.

Es particularmente importante el período transitorio subsiguiente a los saltos de regulación de potencia (variaciones bruscas del caudal de combustible), o durante el arranque o la parada.

En este tipo de instalaciones se utilizan los siguientes tipos de sistemas de regulación de potencia:

Regulación continua.

Regulación progresiva por etapas.

Regulación todo-nada.

Los sistemas de regulación continua ajustan el consumo instantáneo de combustible de acuerdo con la señal de un circuito de control provisto de sus correspondientes sensores (p.e. control de temperatura en el hogar), según un programa cronológico previamente establecido (temple de hornos, etc.) o según las demandas de potencia del proceso. Estos sistemas son, generalmente, complicados y costosos por lo que se utilizan solamente en plantas industriales cuyo proceso requiere de este tipo de regulación.

Sin embargo, en multitud de plantas industriales y en centrales de calefacción doméstica cuya incidencia en la contaminación de ciudades es particularmente importante se utilizan los sistemas de regulación por etapas o todo-nada, siendo este último tipo el más extendido. En ambos tipos la regulación es automática en función de la instrucción del sistema de control que generalmente está mandado por sensores térmicos en el circuito del cambiador de calor.

En los sistemas de regulación por etapas cada etapa corresponde a un flujo determinado de combustible que estará en funcionamiento durante un intervalo determinado de temperaturas de salida del fluido circulante en el cambiador de calor.

En la regulación todo-nada un termostato colocado, geneu

ralmente a la salida del cambiador cortará el aporte de combustible cuando se alcanza la temperatura máxima de regulación y lo volverá a poner en marcha cuando se alcance el valor mínimo de la temperatura de regulación, de forma que la instalación estará funcionando con sucesivos arranques y paradas.

La duración de los intervalos de tiempo en que la instalación esté en reposo y en funcionamiento dependerá de las condiciones de trabajo de la misma y de los del circuito de utilización. Por ejemplo, en el caso de una central de calefacción para un edificio, si el sistema está muy sobredimensionado con respecto a las necesidades de potencia calorífica del mismo y se mantienen unas temperaturas máxima y mínima de regulación de termostato prefijadas, los tiempos de funcionamiento serán cortos y los de parada relativamente largos. Por otra parte, la tendencia a instalar centrales sobredimensionadas está justificada porque el usuario desea garantizar que dispone de calefacción suficiente para los días más fríos y el instalador obtiene mayor beneficio al montar una instalación más grande. Entonces en días normales la instalación estará funcionando con una excesiva intermitencia, y con períodos de funcionamiento cortos, y períodos de descanso comparativamente grandes. En estas condiciones la instalación estará funcionando una proporción grande de su tiempo en condiciones transitorias lo que justifica el interés de estudiar los efectos de contaminación

en dichas condiciones.

Como se ha visto en el apartado III, el gasto de aire correspondiente al estado estacionario se obtiene cuando los gases de chimenea alcanzan una temperatura estable definida por la temperatura de salida del cambiador y por las pérdidas térmicas a través de las paredes de la chimenea.

Cuando se presenta un corte de combustible el ventilador continúa girando durante un corto período de tiempo y el efecto de convección permanece de forma que empieza a circular por el circuito aire frío que a su vez alcanza la chimenea disminuyendo así progresivamente al efecto de convección. Si el período de reposo es suficientemente elevado el aire que circula por el hogar y la chimenea va enfriando las paredes de todo el circuito de forma que el efecto de convección se hace prácticamente nulo.

En la Fig.5.6 se representan las curvas de la Fig.5.5 en el momento del arranque, en período transitorio y en estacionario.

Como se ve el punto de funcionamiento se desplaza a lo largo de la curva A desde la posición correspondiente a gasto nulo (F_1) hasta la de funcionamiento estacionario. La secuencia del arranque de un quemador automático típico es la siguiente:

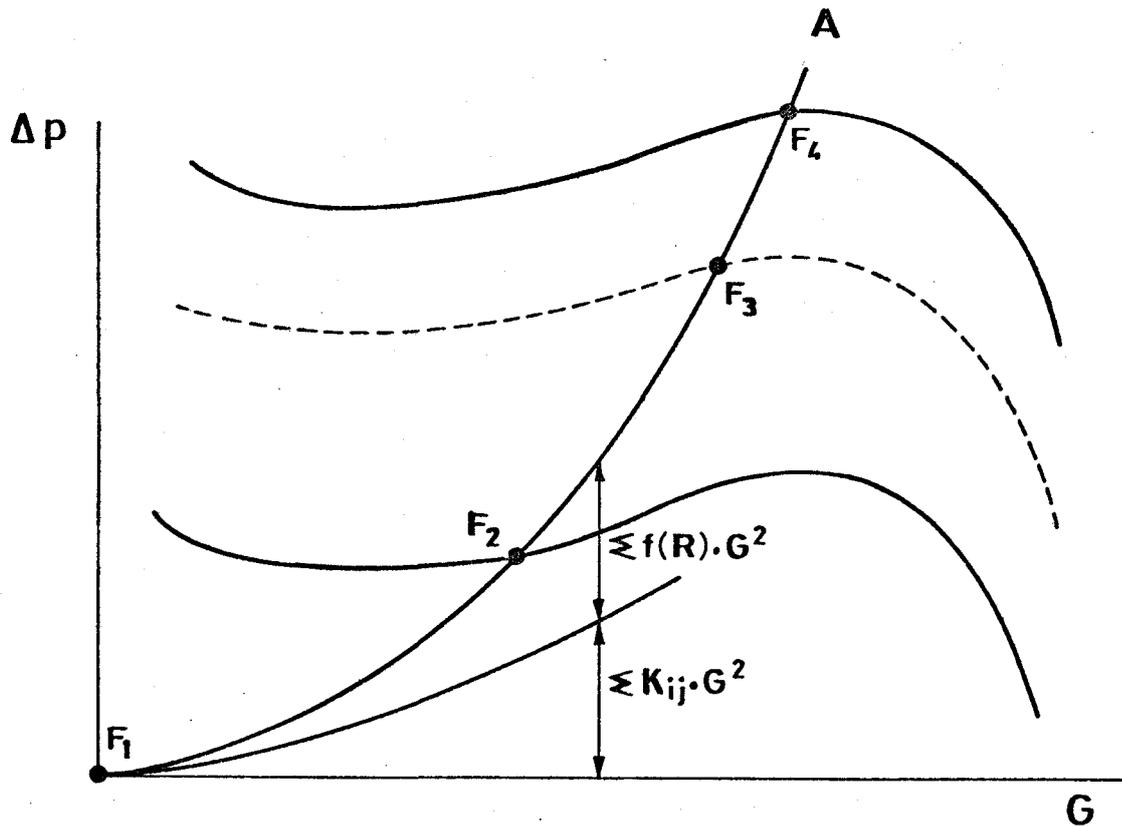


Fig.5.6

1°) Se pone en marcha el ventilador sin inyectar combustible poniendo en movimiento una corriente de aire a través del sistema mediante circulación forzada pero sin efecto de convección, de forma que al final de este período el punto de funcionamiento sería el F_2 .

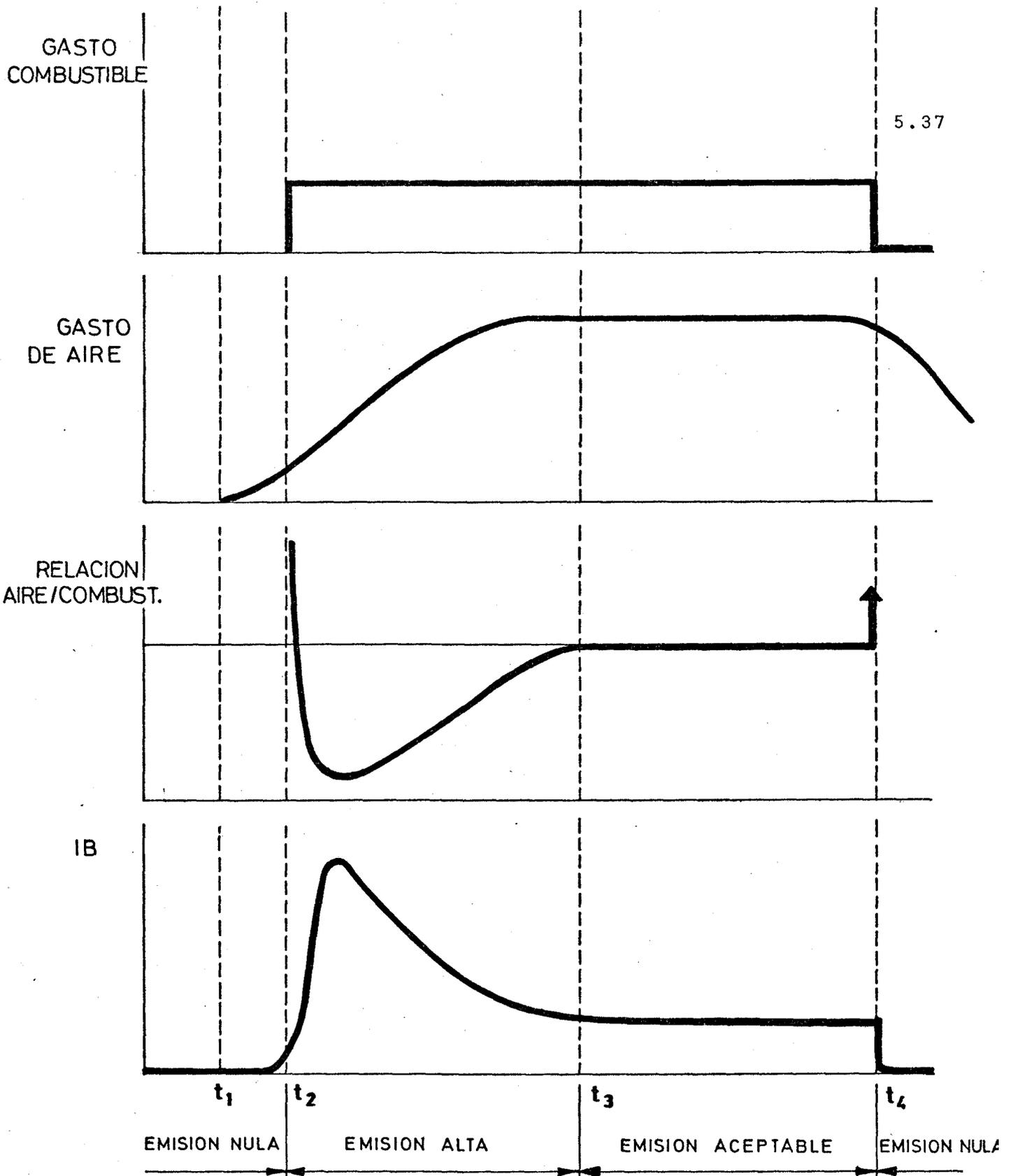
2°) Se inicia la aparición de chispa de encendido entre los electrodos de ignición, y poco después abre la válvula de combustible y empieza la inyección a gasto de combustible sensiblemente constante, inmediatamente tiene lugar la ignición

del combustible, cuando el gasto de aire todavía es el correspondiente a F_2 de forma que inicialmente la relación aire/combustible es francamente inferior a la nominal.

Los gases quemados van llenando la chimenea y se va estableciendo el efecto de convección (punto F_3) y lentamente van calentando las paredes del circuito y se va elevando la temperatura del gas e incrementando este efecto de convección hasta alcanzar las condiciones estacionarias correspondientes al punto F_4 .

En la Fig.5.7 se presentan las evoluciones con el tiempo típico de los gastos de aire y combustible y de la relación aire/combustible durante la secuencia de arranque, y en la parada subsiguiente, correlacionándolos con las variaciones del Índice de Bacharach para evidenciar los períodos de alta y baja contaminación.

En esta figura puede verse que durante el intervalo de tiempo t_2-t_3 las emisiones de contaminantes son superiores a las de funcionamiento estacionario. Experiencias realizadas en la instalación experimental de que se dispone en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial "Esteban Terradas" que reproducen una instalación central de calefacción doméstica de tipo medio han demostrado, como se verá más adelante, que estos intervalos de tiempo pueden alcanzar duraciones del orden



- t_1 = Instante de puesta en marcha del ventilador.
 t_2 = Instante de iniciación de la inyección.
 t_3 = Tiempo en que se alcanzan condiciones estacionarias.
 t_4 = Corte de combustible.

Fig.5.7

de la media hora. Teniendo en cuenta que dentro de este intervalo existen períodos de contaminación excesiva se deberían tomar las medidas oportunas para minimizar el número de arranques permitidos a lo largo de una jornada de forma que los tiempos de funcionamiento sean grandes comparados con los de puesta en régimen estacionario. Estas medidas deberían dirigirse a comprobar que no existe un dimensionamiento excesivo de la instalación frente al edificio, y a exigir un intervalo adecuado entre las temperaturas de máxima y mínima del termostato para evitar la frecuencia exagerada de cortes.

5.5 Análisis de los gases de combustión. Definición de un método de determinación de la relación aire/combustible a partir del análisis de gases.

Los fuel-oils utilizados comúnmente en fuentes fijas están constituidos esencialmente por una mezcla de hidrocarburos e impurezas de diversos tipos cuyas proporciones dependen de la procedencia de los crudos de origen y del proceso de refinado posterior para su obtención.

La composición química resulta así extraordinariamente compleja por lo que para la identificación, clasificación y definición de sus características esenciales químico-energéticas se suele emplear sencillamente la relación en peso de contenido entre carbono e hidrógeno (C/H) del combustible.

Los valores de esta relación aumentan al pasar de los productos más ligeros a los más pesados y determinan a su vez los valores del poder calorífico. De esta relación C/H dependen también el peso específico y la viscosidad del producto de forma que valores altos de C/H corresponden a combustibles de alto peso específico y elevada viscosidad. Incluso la luminosidad y radiación de la llama está ligada con dicha relación, ya que la emisividad depende del mecanismo de combustión a través de la pulverización del combustible efecto que está influenciado por las propiedades físicas antes citadas.

Los valores de esta relación para los fuel-oils de las diversas procedencias varían entre 7 y 9, encontrándose alrededor de 8 la mayor parte de los fuel-oil prácticos.

La mezcla compleja de hidrocarburos que forma el fuel-oil, va siempre acompañada de un contenido variable de impurezas que dependen también de la procedencia del crudo y de su tratamiento.

Entre estas impurezas existe siempre agua emulsionada en cantidades que, generalmente, oscilan del 0.1% al 1%.

Como impureza del mayor grado de importancia desde el punto de vista de los efectos contaminantes se encuentra siempre azufre y compuestos sulfurosos en cantidades que pueden oscilar del 0,5% al 8% en peso.

El azufre está presente en forma de diversos compuestos difíciles de separar del combustible y siendo su presencia altamente indeseable tanto por los problemas de contaminación atmosférica que plantea, como por los de corrosión en el horno y sistema de eyección de gases, y porque contribuye a la formación de gomas en el seno del combustible perjudicando el funcionamiento de la instalación de almacenamiento y trasiego de combustible y del circuito de bombeo e inyección de los quemadores.

Como otras impurezas se encuentran sustancias minerales (cenizas) cuyo contenido varía del 0,05 al 0,25%. Estas cenizas provienen de impurezas inorgánicas contenidas en el yacimiento de los crudos de origen (sales minerales, compuestos organo-metálicos, etc.). Durante la destilación se separan partes importantes de estos compuestos de forma que los destilados tienen, generalmente, proporciones de cenizas inferiores al 0.01%. A pesar de sus pequeñas concentraciones, algunos de estos compuestos intervienen en la combustión formando núcleos de aglomeración que dan lugar a partículas de hollín, generalmente de gran poder corrosivo, y cuyos depósitos sobre los cambiadores de calor reducen, en cualquier caso, la transmisión de calor y, por tanto, la eficiencia de la instalación.

Todas estas impurezas se encuentran, como se ha visto, en pequeñas proporciones en el combustible, de forma que si

bien tienen una gran importancia para los efectos de contaminación, por dar lugar durante la combustión a productos contaminantes, prácticamente no afectan a la estequiometría y forma de realizarse dicha combustión.

Dada la pequeña concentración de impurezas que comúnmente poseen los combustibles al estudiar la estequiometría de la combustión se pueden despreciar dichas impurezas, y tratar la combustión idealmente en sus componente esenciales como la reacción del hidrógeno y el carbono contenidos en el hidrocarburo con el oxígeno del aire; dando simplemente como productos de la reacción, anhídrido carbónico, vapor de agua y nitrógeno que aparecería como gas inerte.

Si dicha combustión tiene lugar parcialmente se denomina combustión incompleta, en este caso parte del carbono no se transformaría en CO_2 sino que daría lugar a cierta proporción de CO o de otros compuestos carbonosos, y parte del hidrógeno podría aparecer libre o en forma de hidrocarburo.

Para obtener una combustión completa es necesario conseguir un mezclado perfectamente homogéneo del combustible con el suficiente aire para aportar el oxígeno preciso para la reacción. Ya que la mezcla perfecta es físicamente imposible de conseguir en el corto tiempo de que se dispone en la práctica, se utiliza siempre un cierto exceso de aire sobre el teórico

camente necesario, de forma que en los productos de toda combustión en un generador de calor práctico se encontrará siempre oxígeno libre.

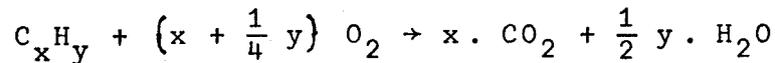
Como se justificará más adelante, tanto con excesos de aire muy grandes como muy pequeños se obtendrán combustiones incompletas con formación de partículas carbonosas que dan lugar a la aparición de humos visibles. Esto justifica el interés de obtener el gasto de aire apropiado según se citó anteriormente para alcanzar una combustión bien regulada.

El análisis de los productos de la combustión proporciona el método para evaluar el grado de perfección de la combustión alcanzado en cada caso y para determinar la relación aire/combustible. Midiendo entonces solamente el caudal de combustible, se obtiene el gasto de aire sin necesidad de su medida directa.

En los productos de las combustiones normales en generadores de calor se tienen concentraciones de CO y de inquemados, siempre muy pequeños en comparación con las concentraciones de CO₂, de forma que su presencia, como la de las impurezas del combustible, prácticamente no afecta a la estequiometría de la combustión y puede, por tanto, prescindirse de estos compuestos.

Entonces la reacción estequiométrica de un hidrocarburo

de fórmula C_xH_y con oxígeno sería:



La relación oxígeno/hidrocarburo en peso resultante será:

$$\frac{m_{O_2}}{m_{C_xH_y}} = \frac{32 \left(x + \frac{1}{4} y\right)}{12x + y}$$

Los pesos producidos de H_2O y CO_2 por unidad de peso de hidrocarburo quemado serán:

$$\frac{m_{CO_2}}{m_{C_xH_y}} = \frac{44x}{12x + y} : \frac{m_{H_2O}}{m_{C_xH_y}} = \frac{9y}{12x + y}$$

Admitiendo que el aire contiene un 23% en peso de O_2 , y el resto es N_2 . La relación aire/combustible en peso sería:

$$\frac{m_A}{m_{C_xH_y}} = \frac{1}{0.23} \cdot \frac{32 \left(x + \frac{1}{4} y\right)}{12x + y}$$

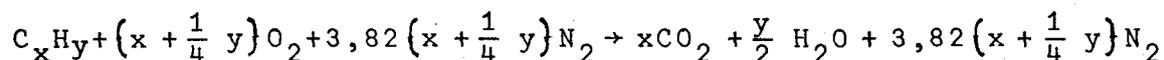
y definiendo el coeficiente de exceso de aire como

$$\lambda = \frac{m_A}{m_{A \text{ est}}}$$

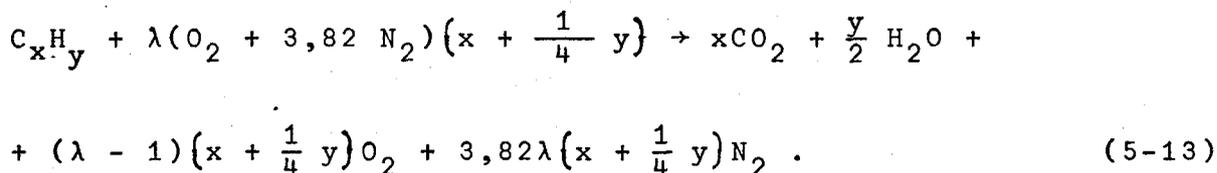
Se obtiene la relación aire/combustible en una combustión diluida:

$$\frac{m_A}{m_{C_xH_y}} = \frac{\lambda}{0,23} \frac{32x + 8y}{12x + y}$$

La relación estequiométrica con aire será



Y la correspondiente a un coeficiente de exceso de aire:



Para todos los ensayos que se describen más adelante se ha utilizado un fuel industrial tipo CAMPSA que responde a las siguientes características:

Peso específico: 0,945 Kg/dm³

Composición media: C = 85,5% en peso

H = 11,5% en peso

S = 3,0% en peso

Peso molecular medio: 330

Con estos valores se obtiene $\frac{C}{H} = 7,43$

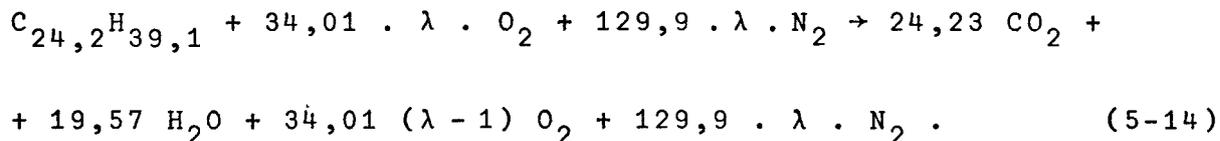
$$\frac{12x}{y} = 7,43$$

$$12x + y = 330$$

$$x = 24,23 \quad ; \quad y = 39,14$$

Despreciando impurezas se admite que el fuel-oil empleado responde entonces a la fórmula: $C_{24,2} \cdot H_{39,1}$

Particularizando (5-13) para este combustible se tiene:



El método de análisis de gases utilizado, que se describe más adelante, detecta la concentración volumétrica de los distintos productos en los humos secos. En particular, para la determinación de λ se registra la concentración de CO_2 y como comprobación la de O_2 .

La concentración de CO_2 puede expresarse a partir de (5-14) como:

$$CO_2(\% \text{ vol}) = \frac{24,23}{24,23 \cdot 34,01(\lambda-1) + 129,9\lambda} = \frac{24,23}{163,9\lambda - 9,78}$$

Expresión que se ha representado en la Fig.5.7.

La concentración de O_2 se obtiene igualmente como:

$$O_2 (\% \text{ vol}) = \frac{34,01 (\lambda-1)}{24,23 + 34,01 (\lambda-1) + 129,9}$$

Que se ha representado también en la Fig.5.7 para ser utilizada como comprobación.

La precisión en la medida del gasto de aire ha resultado muy buena para mezclas con excesos de aire, en los cuales las

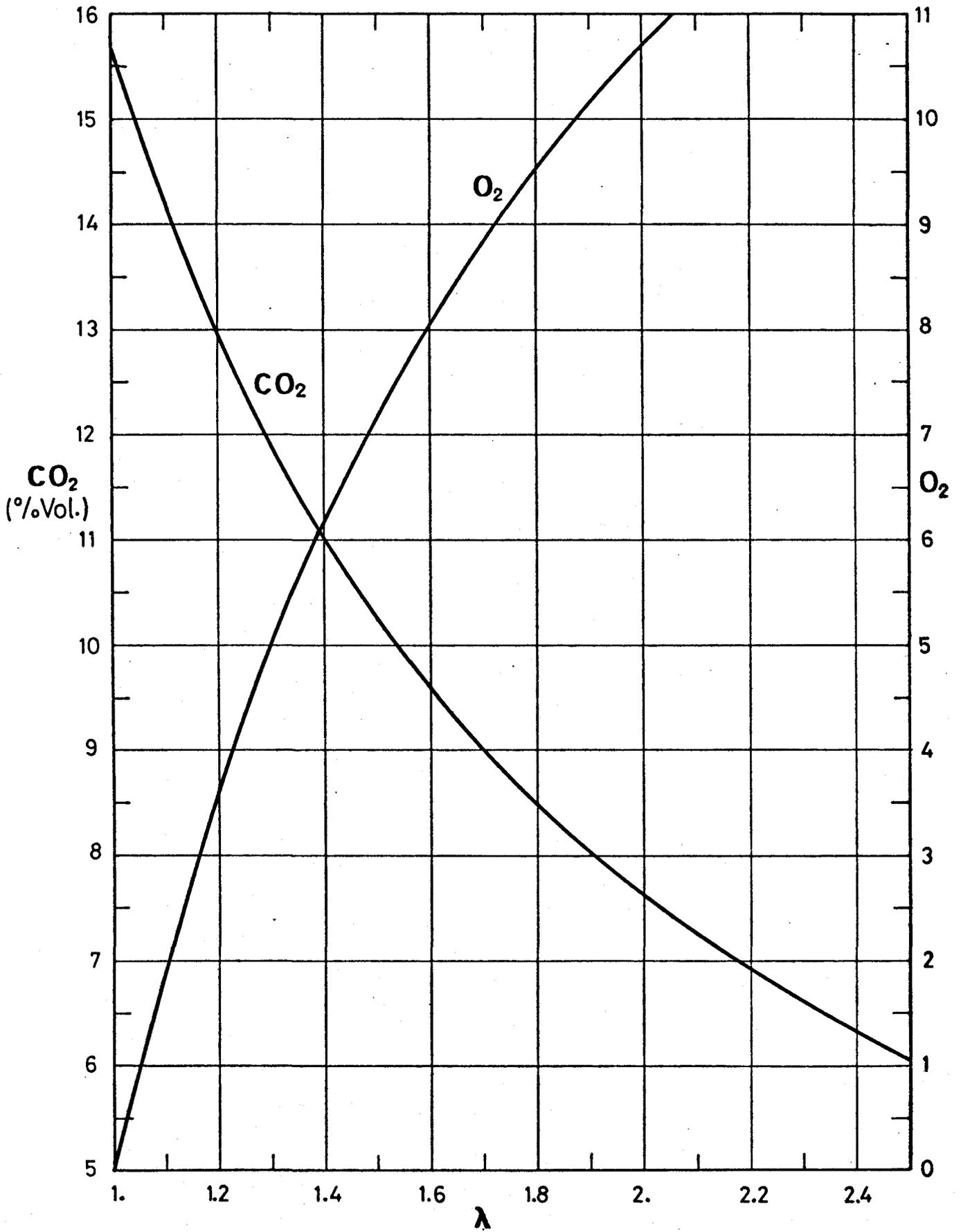


FIG. 5-7

concentraciones de otros productos (SO_2 , CO_2 , H , CH , NO_x) resultan despreciables en comparación con las de CO_2 y O_2 . Esta condición se da siempre en las combustiones de interés práctico en los hogares de los generadores de calor y se ha evidenciado así durante los ensayos.

5.6 Estudio experimental del desarrollo de la combustión en un generador de calor y sus efectos contaminantes.

Los objetivos fundamentales del trabajo experimental se han dirigido al estudio de formación de contaminantes en el hogar mediante una exploración específica del mismo obteniendo temperaturas y concentraciones de los diversos componentes en cada punto para condiciones estacionarias dadas, más un estudio del comportamiento de la planta completa encaminada a determinar un método racional de regulación de acuerdo con lo expuesto en el párrafo 5.3, y como última parte del trabajo un análisis experimental de las características en condiciones transitorias para evidenciar los efectos expuestos en el párrafo 5.4.

Tan interesante como los propios resultados de cada uno de estos objetivos, se debe considerar el desarrollo de toda esta labor experimental que ha supuesto la puesta a punto de la planta de ensayos, la construcción de sondas y medidores especiales y el desarrollo de nuevas técnicas experimentales y

métodos de análisis de productos de combustión. La realización de toda esta experimentación ha conducido a un incremento muy estimable en la experiencia del equipo investigador sobre nuevas técnicas específicas de análisis de productos de combustión de hidrocarburos en general, y en particular sobre el proceso de métodos de análisis de óxidos de nitrógeno a los que se ha dedicado una especial atención a lo largo de este trabajo.

La descripción detallada de los métodos e instrumental desarrollado superaría el volumen lógico de esta publicación, pero a continuación se presenta una descripción muy somera de los principales aspectos de la planta de ensayos y de los desarrollos de equipo instrumental.

5.6.1 *Planta de ensayos*

Como planta de ensayo se ha utilizado una caldera de calefacción doméstica central de tipo comercial modelo ROCA R-511-M. Instalada en el Laboratorio de Contaminación del Departamento de Motopropulsión del INTA, sobre la que se han realizado las modificaciones y montajes necesarios para el acoplamiento de sondas y medidores.

La citada caldera forma el hogar y cambiador de calor mediante el acoplamiento de elementos de fundición huecos en cuyo interior circula el agua, estando la pared bañada por los productos de la combustión. El fondo y una parte de las pare-

des está recubierto de material refractario para evitar la posible presencia de zonas frías próximas a la llama que darían lugar a combustión incompleta.

La potencia calorífica nominal de esta planta de ensayos es de 270.000 Kcal/h con una superficie de intercambio de 21,6 m² y un volumen de hogar de 0,880 m³.

En la Fig.5.8 se presentan las dimensiones generales del hogar y en la Fig.5.9 una vista de la caldera con el quemador y sistemas de medida.

El circuito de agua de calefacción es abierto a través de un cambiador de calor de tipo mezclador, con impulsión por bomba según se presenta en el esquema de la Fig.5.10. La evacuación de calor tiene lugar al circuito de agua fría del mezclador, esta disposición permite una regulación simple de la potencia útil requerida variando solamente el gasto de agua fría al mezclador con lo que se puede seleccionar la temperatura de entrada de agua a la caldera. Para la medición de la potencia útil se ha dispuesto un sistema de medida por pesada del gasto de agua fría, que juntamente con el salto de temperaturas correspondiente a los termopares T₃ y T₄ proporciona la potencia gastada en este caso en calentar el caudal de agua fría, y que resulta equivalente a la transmitida a través del circuito de radiadores del edificio en una instalación convencional de este tipo de calderas.

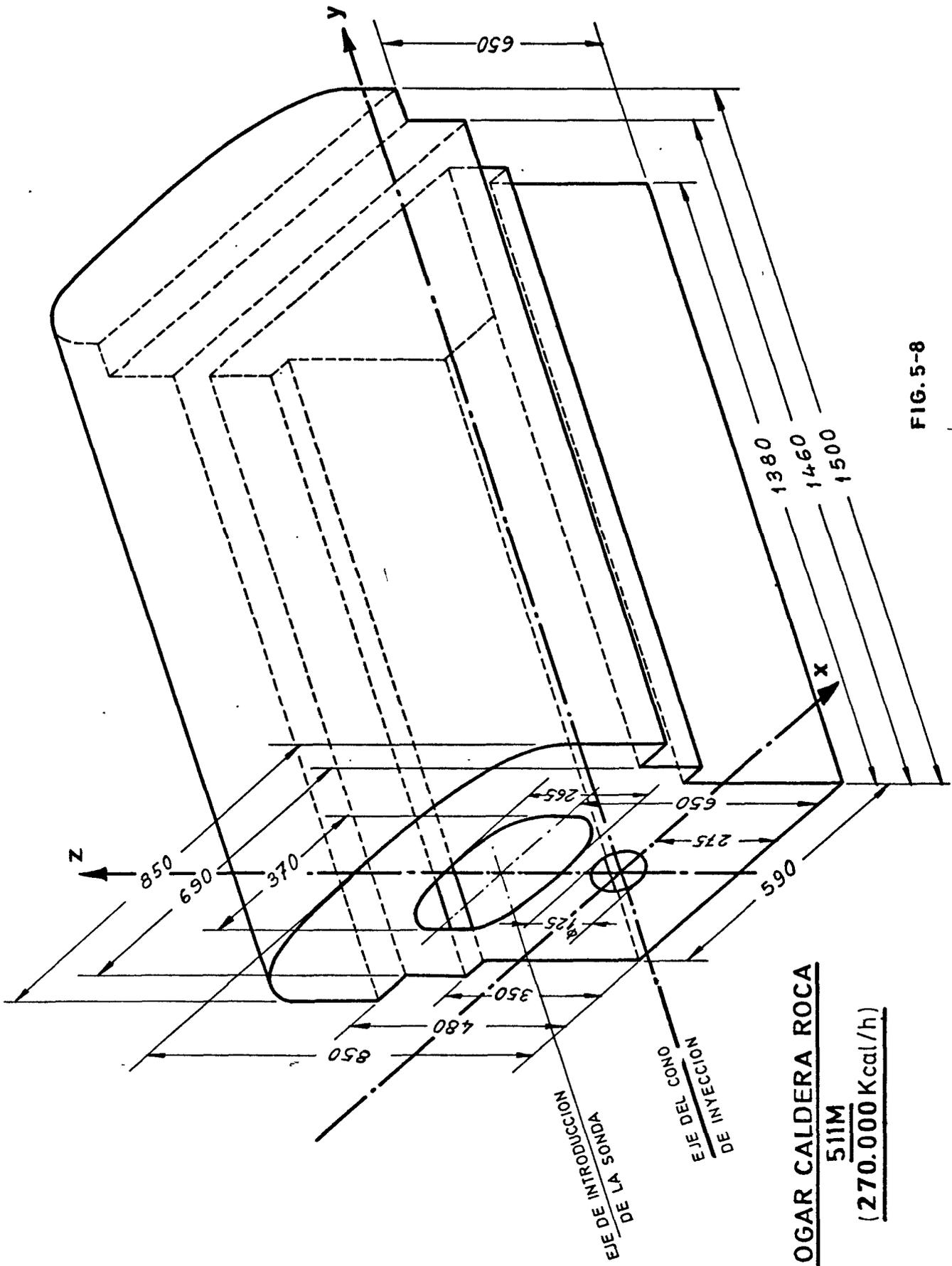
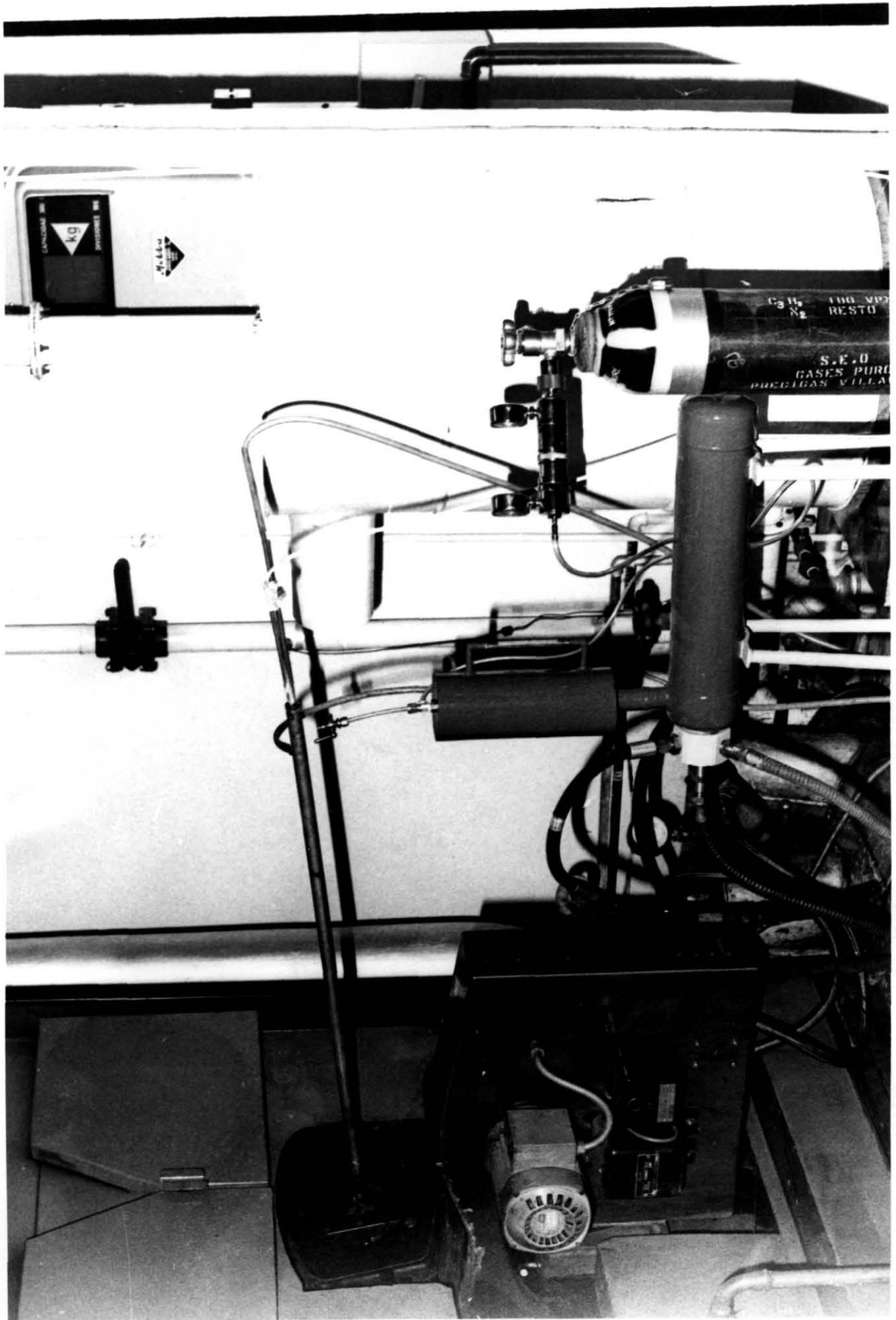
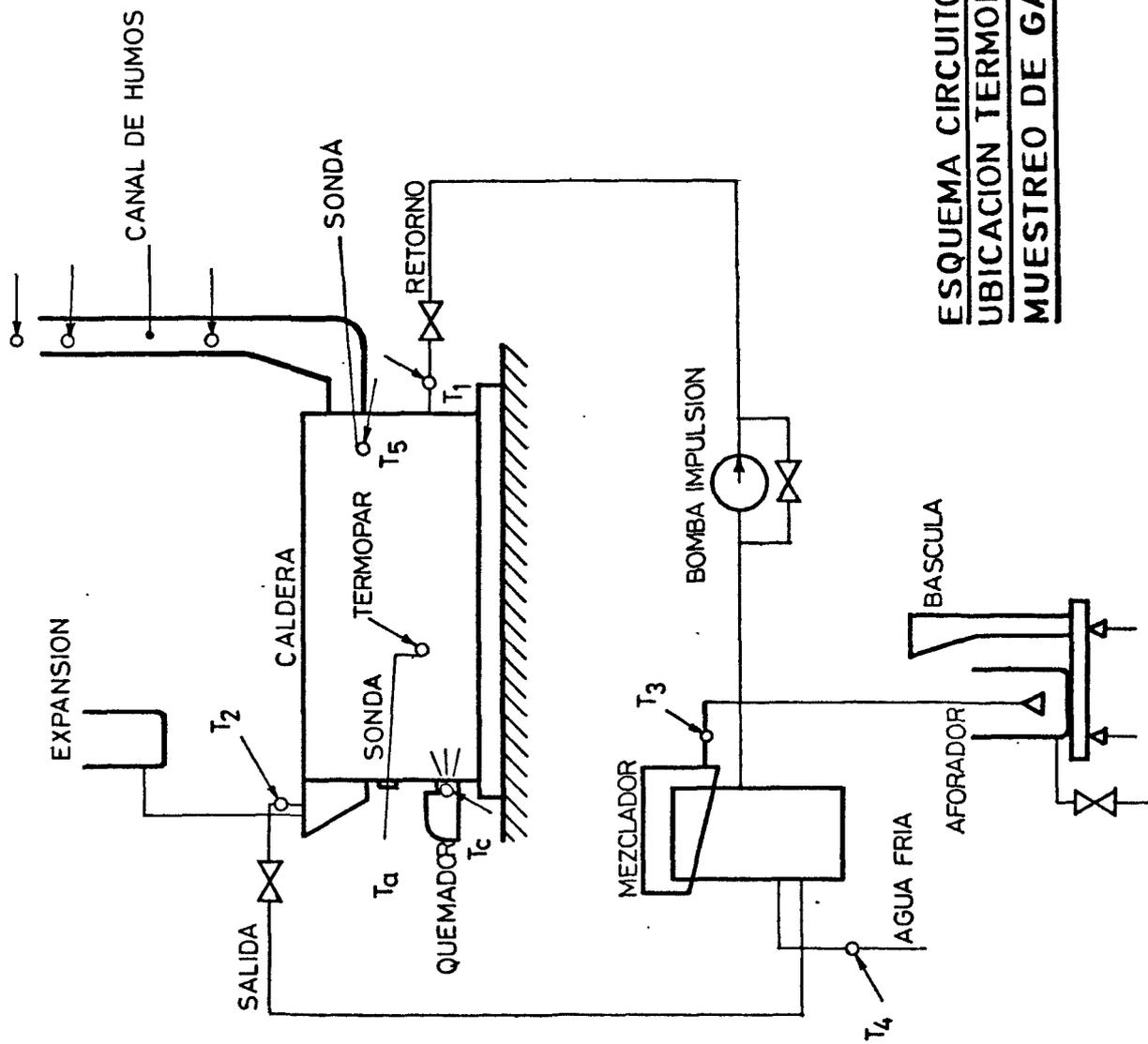


FIG. 5-8





**ESQUEMA CIRCUITO DE AGUA,
UBICACION TERMOPARES Y
MUESTREO DE GASES**

FIG. 5-10

La planta de ensayo se ha equipado con un quemador también comercial modelo CENIT CT-30 de pulverización mecánica capaz de suministrar una potencia de 120.000 a 300.000 Kcal/h de carga según el tamaño de inyector utilizado y la presión de inyección correspondiente. Además del precalentamiento de fuel en depósito y conducciones, el quemador va dotado de un calderín de precalentamiento antes de la inyección equipado de termostato. Todos los ensayos se han realizado con el termostato calado a una temperatura de corte de 70°C recomendada por el constructor para el fuel utilizado.

Para la evacuación de humos la caldera está equipada con una caja colectora de humos a la que se ha acoplado un conducto de evacuación para su conexión a la chimenea de sección cuadrada de 0.5 m de lado y 14 m de altura. En la caja de humos y conductos de evacuación se han dispuesto soportes para las sondas necesarias de análisis de gases y medidas de humos (Fig.5.11). La chimenea posee registros en varias estaciones a lo largo de su altura y en la salida, lo que permite realizar muestreos de gases en dichas estaciones.

5.6.2 *Equipo instrumental*

La planta de ensayos descrita se ha equipado con los equipos de medida, análisis de gases y registro necesarios para el control de todas las variables necesarias. Así se ha

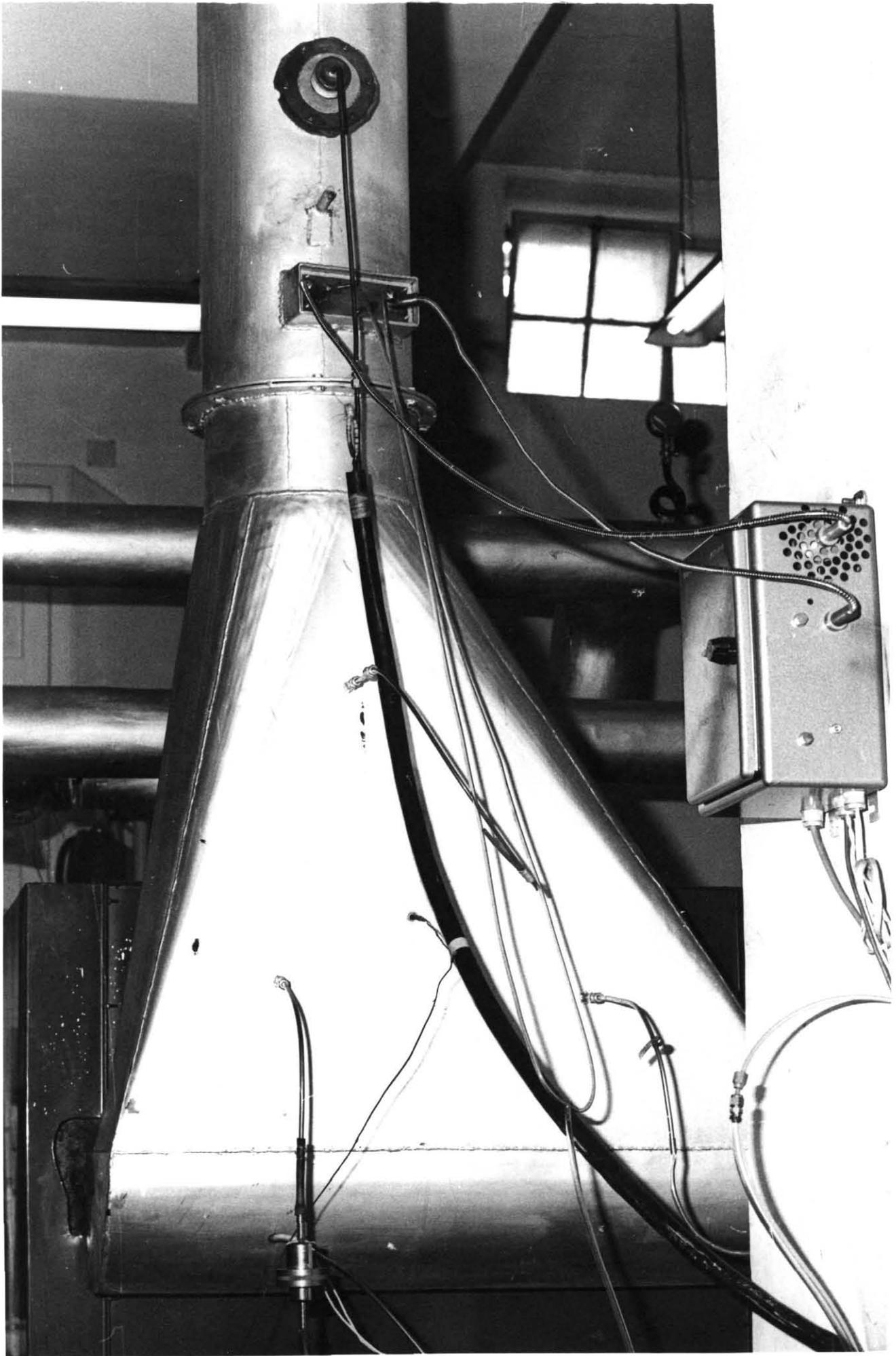


FIG. 5-11 (TOMA DE MUESTRAS EN CAJA DE HUMOS)

calibrado un sistema de termopares para el registro de temperaturas en los siguientes puntos:

Entrada de agua a caldera	T_1
Salida de agua de caldera	T_2
Entrada de agua fría a mezclador . . .	T_4
Salida de mezclador	T_3
Temperatura del fuel-oil en la inyección	T_c
Temperatura del aire ambiente	T_a

Temperatura en hogar (sonda móvil)

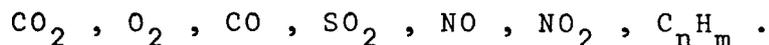
Temperatura en caja de humos

Temperatura de humos en chimenea (tres alturas)

cuyas situaciones pueden apreciarse en la Fig.5.10.

Se ha registrado igualmente la depresión en el hogar, mediante captador manométrico de alta velocidad de respuesta para determinar la presencia de condiciones oscilatorias o transitorias de corta duración.

Para el análisis de gases se ha montado, puesto a punto y calibrado un completo equipo de analizadores equipados con registrador que permiten el registro de los siguientes productos de la combustión



La captación de las muestras de gases se realizaba a través de la sonda especial desarrollada para la prospección

del hogar que se describe posteriormente, o directamente de la caja de humos. El transporte de las muestras a los analizadores se ha realizado a través de una instalación de acondicionamiento de la muestra de forma que el gas entra en los analizadores seco y exento de partículas sólidas, mientras es mantenido a lo largo del transporte a temperatura adecuada para que no se presenten reacciones de formación o descomposición de los componentes a medir en cada caso. En dichas condiciones la lectura de los analizadores se da siempre en volúmenes del componente medido respecto del volumen total de mezcla de gases secos.

En el analizador de CO_2 que es de conductividad térmica, se mide el desequilibrio de un puente de Wheastone una de cuyas ramas es una célula por la que fluye la muestra a analizar. La conductividad térmica de la muestra es función de su concentración en CO_2 , y modifica el desequilibrio del puente. El sistema es sensible a las variaciones de temperatura por lo que se mantiene aislado en cabina termostatada a 60°C . El rango de medida del analizador se encuentra en el margen $0 - 20\%\text{CO}_2$.

Para el registro de O_2 se ha dispuesto un analizador termomagnético, en el que se registran las variaciones de paramagnetismo de la muestra que atraviesa la célula del analizador, los cuales son función de la concentración en O_2 de la mezcla. La susceptibilidad magnética varía con la temperatura

por lo que el analizador se mantiene termostatado a 54°C. Su rango de medidas es de 0 - 25% O₂.

El CO se ha registrado a través de un analizador de absorción de radiación infrarroja no dispersiva, en el que la muestra atraviesa una célula radiada que actúa básicamente como una doble columna de absorción, una de las columnas es sensible a todos los componentes de la mezcla absorbente de radiación, mientras que la otra columna es insensible al gas que se pretende analizar. Un sistema de termopilas mide la diferencia de absorción de la radiación en ambas columnas la cual es función de la concentración del componente a medir. El método es también sensible a la temperatura por lo que el analizador se mantiene termostatado a 60°C. Su margen de medida es de 0 - 0,5% de CO.

El analizador de SO₂ es también de absorción de radiación infrarroja no dispersiva, siendo su rango de medida de 0 - 25% SO₂.

En la Fig.5.12 se presenta el equipo completo de análisis y registro de CO₂, O₂, CO y SO₂.

Para el análisis de óxidos de nitrógeno se ensayaron diversos métodos derivados del de Griess-Saltzman y de el del ácido fenoldisulfónico, todos estos métodos demostraron ser tediosos por requerir períodos enormes de tiempo para cada análisis.

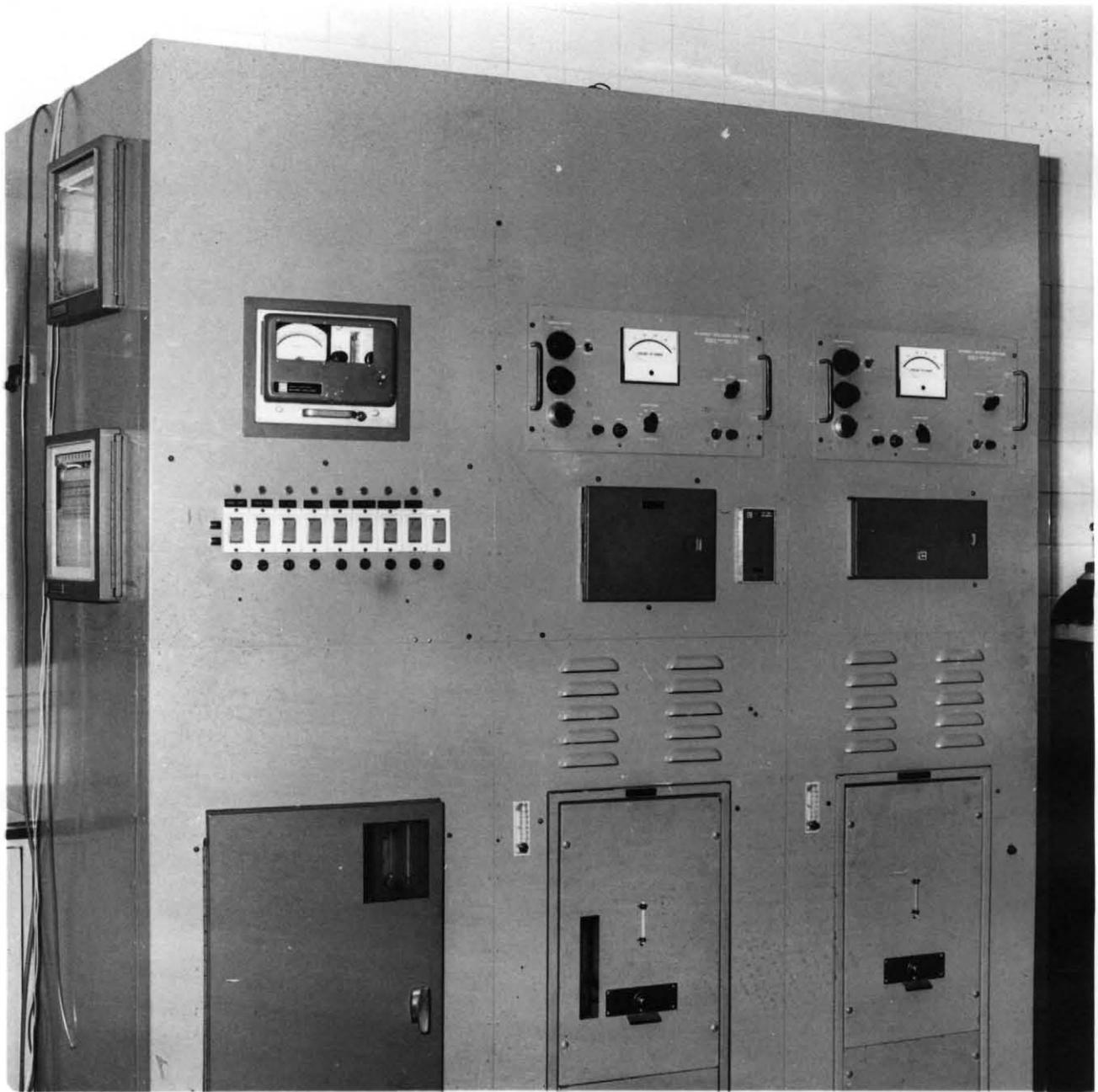
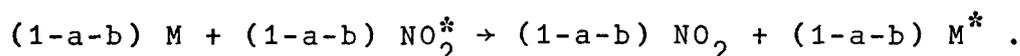
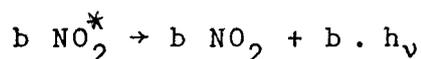
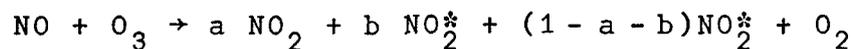


FIG. 5-12 (EQUIPO DE ANALISIS Y REGISTRO DE CO_2 , CO , O_2 Y SO_2)

sis además de un excepcional cuidado durante el proceso para obtener garantía de precisión. En consecuencia, se recurrió a la puesta a punto y contraste de un analizador de NO - NO₂ de quimiluminiscencia, basado en las reacciones:



La primera indica que en la cámara de reacción por cada a moléculas de NO₂ no excitadas aparecen (1-a) moléculas de NO₂^{*} excitadas. (El valor de a depende de los parámetros de operación). La segunda reacción indica que una proporción b de las moléculas de NO₂^{*} excitadas pasan a estado normal con emisión de luz. Mientras que la tercera reacción muestra que el resto de NO₂ excitado cede su energía a las paredes de la cámara y a otras moléculas presentes sin emisión de luz. Para unas condiciones dadas de operación de la cámara de reacción las cantidades a y b son constantes por lo que la cantidad total de luz emitida que es recogida en un fotomultiplicador es proporcional a la concentración de NO en la muestra analizada.

Para la medición de NO_x, la muestra se pasa a través de un convertidor térmico realizado en acero inoxidable a 820°C

y se mantiene tiempo de residencia suficiente en esta condición para reducir todo el NO_2 a NO .

El rango de medida del analizador se extiende de 0 a 10.000 ppm. pudiéndose seleccionar nueve escalas para deflexión completa. (0-1, 0-5, 0-10, 0-50, 0-100, 0-500, 0-1000, 0-5000, 0-10000 ppm). En la Fig.5.13 se presenta el analizador de NO-NO_2 .

El analizador de hidrocarburos es esencialmente un detector de ionización de llama, en el que se establece una llama por combustión controlada de hidrógeno con aire purificado, con la cual se pone en contacto la mezcla a analizar. En la zona de reacción de la llama los átomos de carbono del hidrocarburo presente en la mezcla se ionizan, liberando electrones que son captados por un colector integrado con un sistema electrónico muy estable que alimenta a un galvanómetro, cuya deflexión resulta así proporcional a la concentración de hidrocarburos en la mezcla. El sistema así descrito es capaz de determinar concentraciones de cadenas de 1 a 18 átomos de carbono indiscriminadamente, proporcionando la indicación como carbón total. El rango de medida se puede seleccionar desde 0 a 1 ppm. hasta 0 a 100.000 ppm. en 11 escalas crecientes. En la Fig. 5.14 se presenta la composición del equipo de análisis de HC utilizado, y en la Fig.5.15 el esquema del sistema de transporte de muestras a los analizadores de HC y NO .

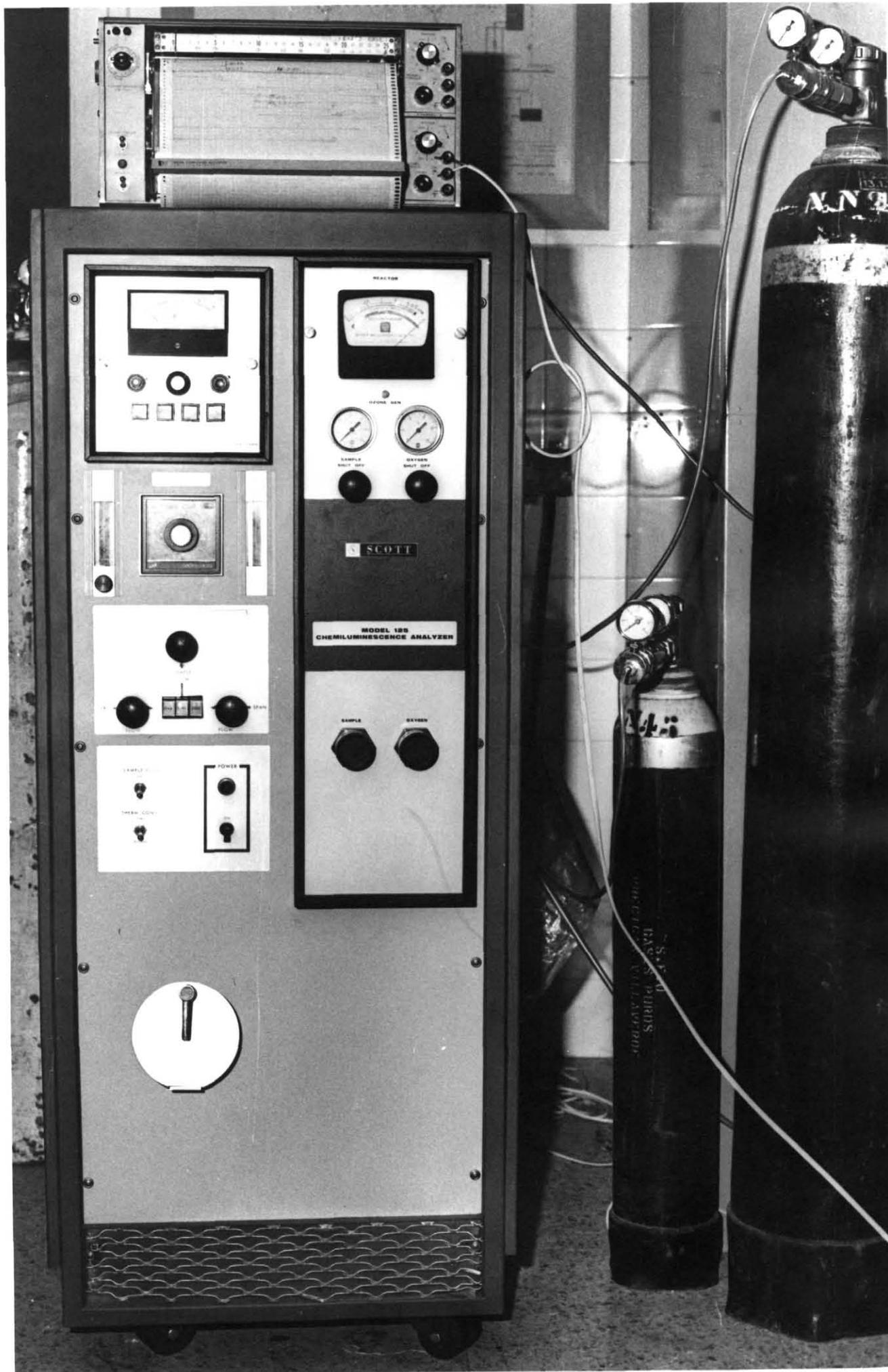


FIG. 5-13 (ANALIZADOR NO - NO₂)

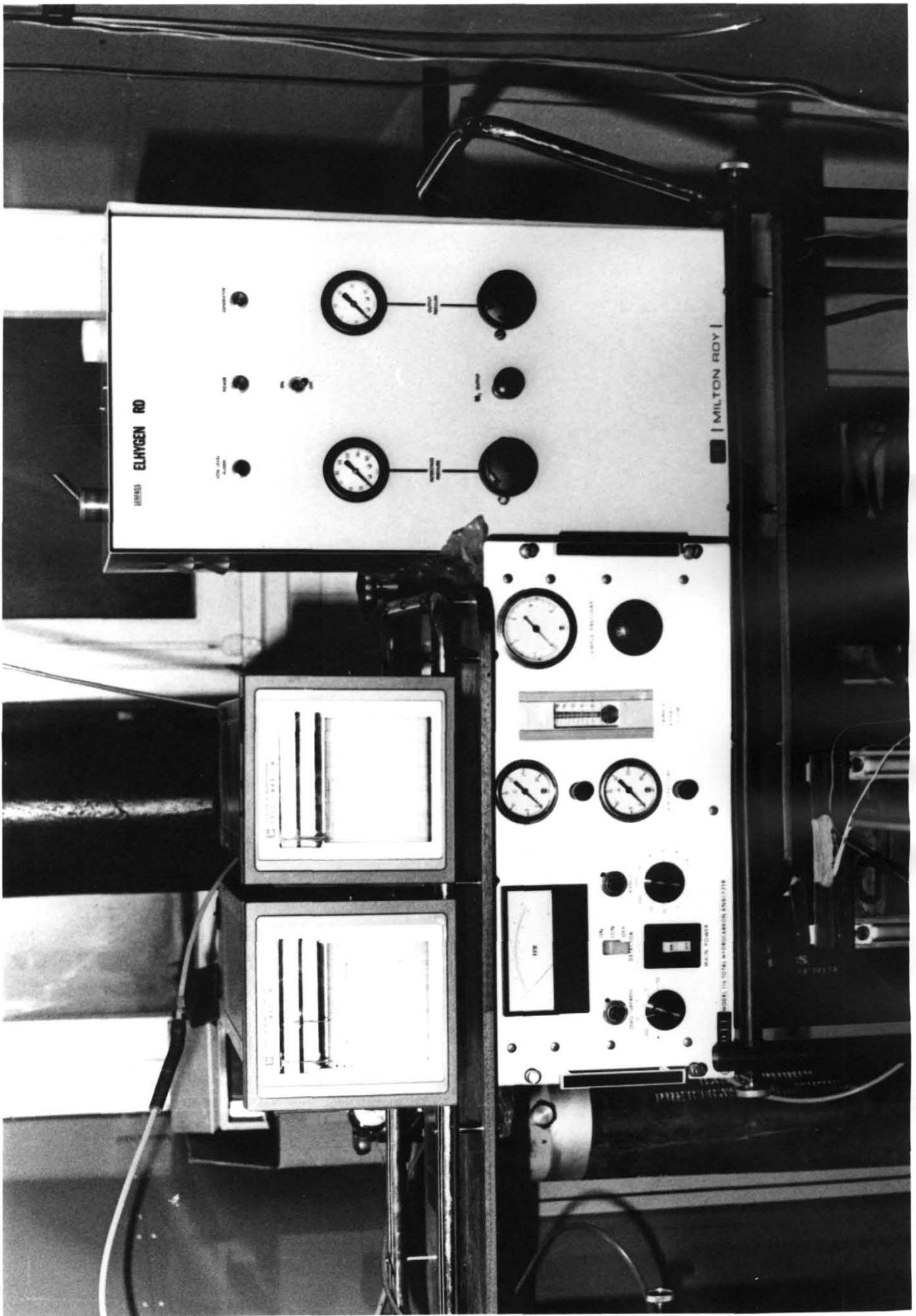
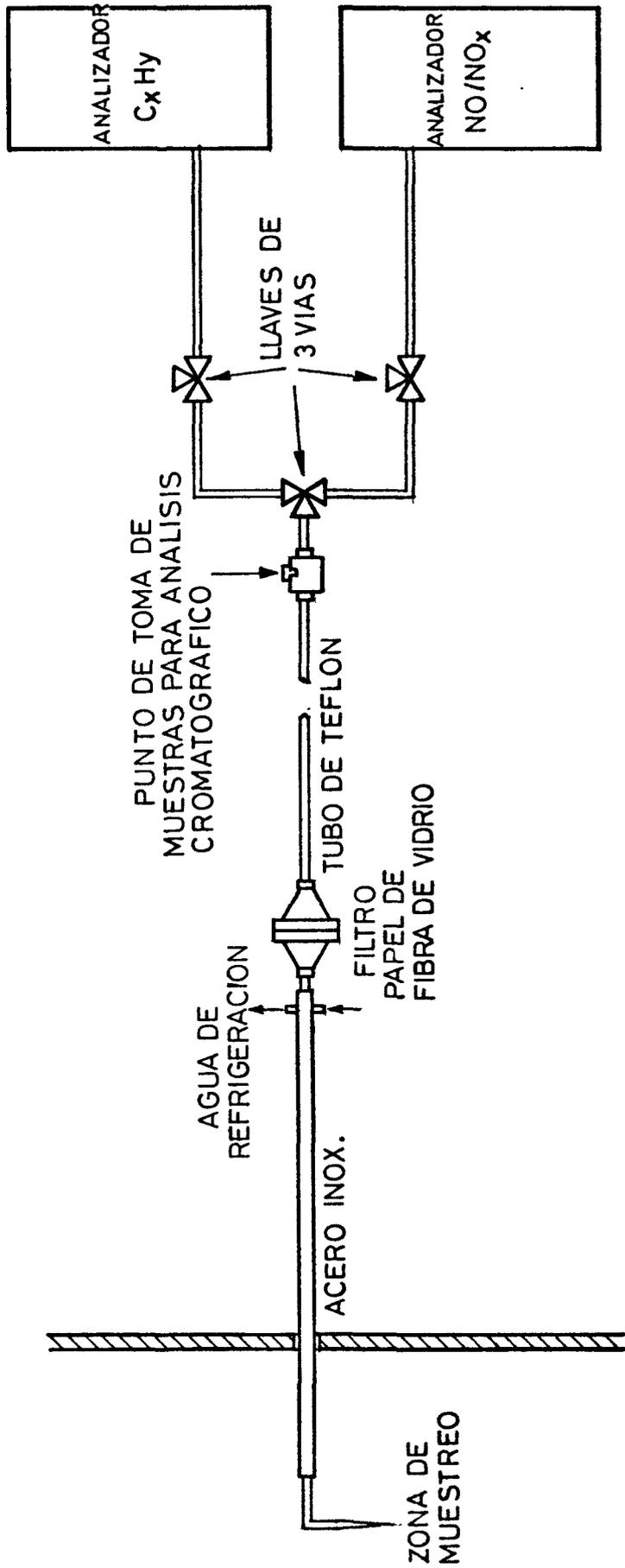


FIG. 5-14 (EQUIPO DE ANALISIS DE HIDROCARBUROS)



SISTEMA DE MUESTREO Y ANALISIS
NO/NO_x - C_xH_y

La puesta a punto de todos estos equipos de análisis se ha completado con la calibración de cada equipo mediante el empleo de botellas de gases calibrados, y por contraste con análisis cromatográficos, colorimétricos o volumétricos. En la Fig.5.16 se presenta el cromatógrafo y en la 5.17 el ph-meter y colorímetro disponibles.

Para la medida del contenido en hollines de los productos de la combustión se ha intentado la puesta a punto y calibración de un opacímetro óptico, instalado en chimenea, basado en la medida de la reflexión de luz de un haz luminoso por los humos en el conducto, en el que las células emisora y receptora están equipadas con fibras ópticas. Se ha encontrado una enorme dispersión de resultados de las medidas conjuntamente con problemas de ensuciamiento de las células por depósitos de hollín que han imposibilitado alcanzar una calibración aceptable del equipo. Por esta razón se ha utilizado para la determinación del índice de humos en chimenea un aparato de Bacharach convencional, con el cual se obtiene muy buena repetibilidad de los resultados de las medidas, si bien obliga a consumir un tiempo de varios minutos no pudiéndose utilizar más que en condiciones de combustión prácticamente estacionarias y no prestándose a la obtención de un registro en continuo.

Por otra parte, el opacímetro de Bacharach no resultaba

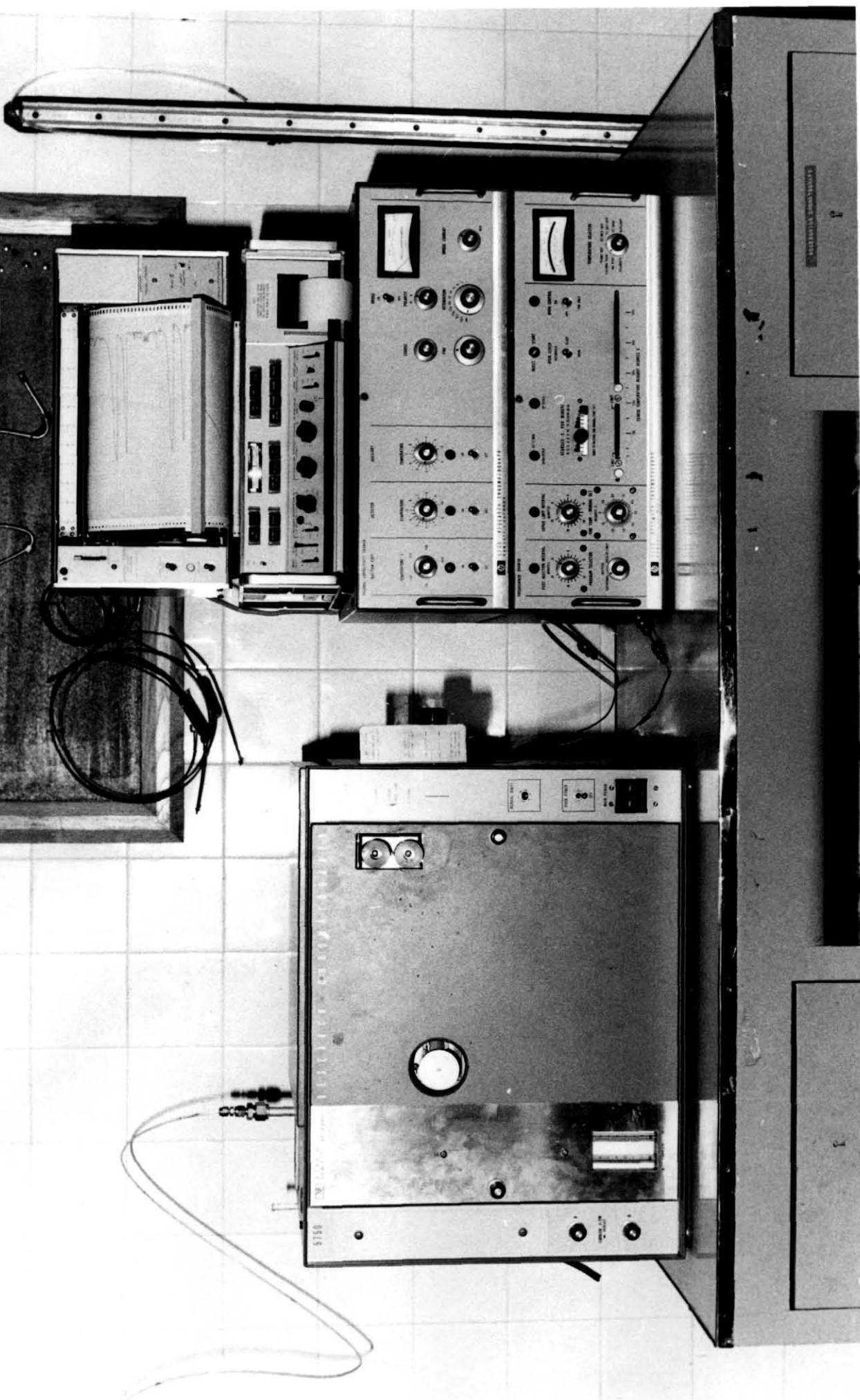


FIG. 5-16 (CROMATOGRAFO DE GASES)

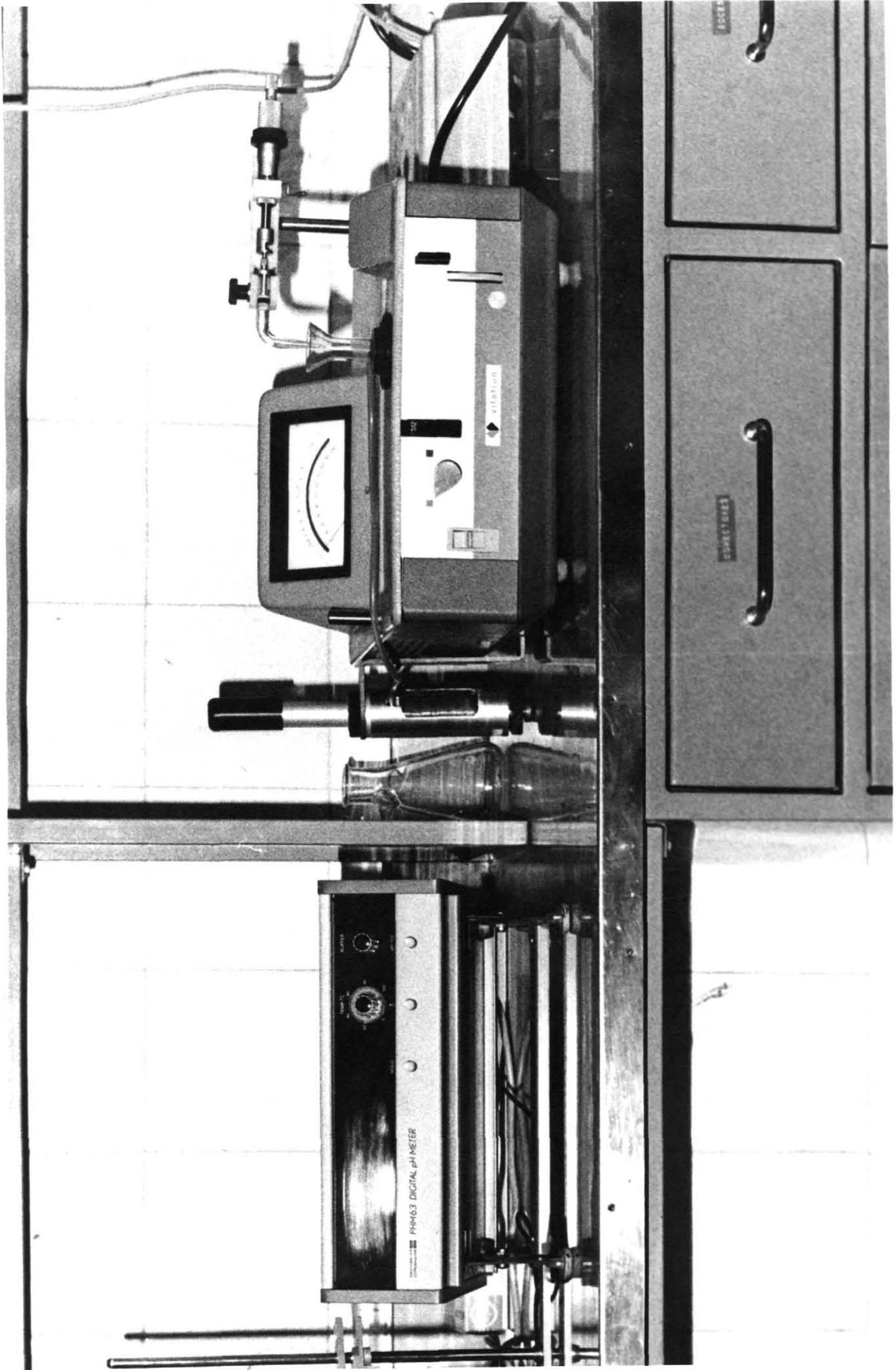


FIG. 5-17 (PH METER Y COLORIMETRO)

aplicable a la exploración del hogar, por lo que se desarrolló y construyó un sistema opacímetro de filtro de papel pero de flujo continuo alimentado con bomba de vacío. Los resultados de este método presentaron muy buena repetibilidad para tiempos de muestreos apropiados y constantes, sin embargo no se ha podido establecer una correlación con los valores del índice de Bacharach ni con otro índice ponderal, por lo que estas medidas tendrán un valor más cualitativo que cuantitativo.

Para la exploración del hogar resultaba poco practicable el montaje de una red de termopares y tomas de gases fijos en el interior del mismo por los problemas de accesibilidad del propio hogar, por la dificultad de colocar soportes para los termopares y tomas y las necesarias protecciones térmicas para los cables de los termopares, así como por las perturbaciones que en la propia combustión produciría el mismo conjunto de captadores con sus sistemas de soportes y protectores. Por estos motivos se decidió diseñar y desarrollar una sonda móvil capaz de medir temperaturas y captar gases en todos los puntos de interés del hogar. Para la introducción de dicha sonda en el hogar se utilizó la portezuela frontal prevista en la caldera para observación de la combustión. Sobre dicha portezuela se montó un soporte especialmente diseñado. Dicho soporte consistía en un disco de eje perpendicular al plano de la portezuela y con posibilidad de giro respecto a dicho eje,

sobre el cual se montó un tambor cuyo eje es perpendicular al del plato, este tambor está provisto de un taladro transversal a lo largo del cual abraza a la caña de la sonda pudiéndose éste introducir más o menos y fijar su posición a voluntad con respecto a dicho tambor. La doble libertad de giro respecto a los dos ejes citados se comporta como una doble articulación, de forma que para un posición fija de la sonda respecto al tambor, la punta de la sonda se mueve en una esfera de radio igual a la longitud de sonda desde el centro del tambor hasta la punta. En la Fig.5.18 se presenta una vista de la sonda con su soporte montado sobre la portezuela.

Ajustando esta longitud a distintos valores la punta de la sonda recorre diversas esferas dentro del hogar, de forma que se puede alcanzar cualquier punto deseado del mismo.

La sonda consiste en un tubo recto de \emptyset 21 mm de acero inoxidable de 1500 mm de longitud en cuyo interior contiene otros tres tubitos de \emptyset 6,3 mm. Uno de estos tubitos es la toma de muestras de gases, el segundo aloja en su interior los cables de un termopar, y el tercero conduce agua de refrigeración hasta la punta de la caña. El agua de refrigeración retorna hasta el extremo exterior de la caña bañando el interior de ésta y el exterior de los tres tubitos. Con esta corriente de refrigeración se evitan deformaciones de la caña por las al



FIG. 5-18 (SONDA DE TOMA DE MUESTRAS Y TEMPERATURAS)

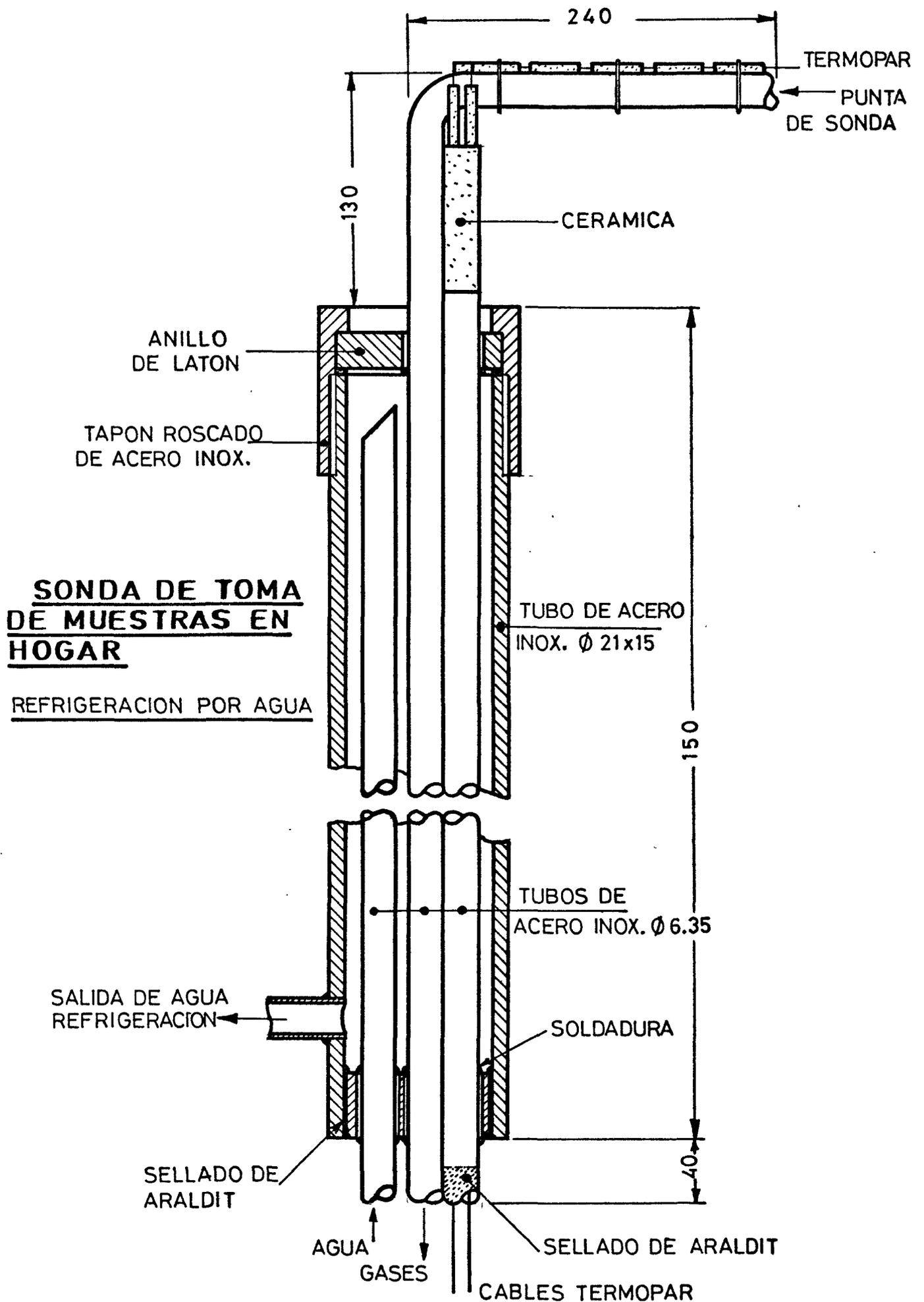
tas temperaturas de las zonas que tiene que atravesar, se protegen igualmente los cables del termopar, y se congela el equilibrio de las reacciones posibles entre los gases componentes de la mezcla muestreada para su envío a los analizadores sin problemas de recombinación a lo largo de la sonda. El tubito de toma de gases se prolonga 130 mm más allá del extremo de la caña y dobla en ángulo recto otra longitud de 240 mm. Los cables del termopar acompañan a dicho tubito convenientemente aislados de forma que la punta del termopar se encuentra muy próxima a la boca de captación de muestra, con lo que la temperatura se mide en el mismo punto en que se están aspirando los gases a muestrear. Con la citada configuración en codo se ha conseguido la posibilidad de muestreo en puntos poco accesibles del hogar y además apartar la caña de la región que se muestrea para evitar perturbaciones de la zona en análisis por la presencia de la caña, la cual podría modificar el campo fluido del punto en estudio y además producir efectos incontralados de "quenching" por pared fría, perjudicando la representatividad de la muestra.

Tanto la caña de la sonda, como el plato y el tambor se han provisto con las correspondientes escalas graduadas y sus referencias para determinar a partir de sus lecturas la posición de la punta de la sonda y ajustarla a los puntos de mues-

treo deseados.

En la Fig.5.19 se presenta la configuración de la sonda y en la Fig.5.20 una representación de su sistema de posicionamiento ante el hogar.

Para el estudio experimental de comportamiento de la planta es evidentemente necesaria la medida con precisión del caudal de combustible. Dadas las características especiales de variación de la viscosidad con la temperatura del fuel-oil, y la circunstancia de que el consumo instantáneo del quemador es la diferencia entre los flujos de los circuitos de alimentación y de retorno, mientras que la presión del circuito de alimentación debe mantenerse constante y próxima al valor de 1 Kg/cm^2 , no se ha conseguido encontrar un caudalímetro comercial capaz de cumplir estos requisitos proporcionando una indicación de caudal instantánea o de duración de medida razonablemente pequeña. En consecuencia, se diseñó y construyó un caudalímetro de fuel de tipo volumétrico especialmente concebido para esta utilización con el que la medida de caudal se realiza manteniendo sensiblemente la presión de alimentación de fuel al quemador. Este caudalímetro mide directamente el consumo a través del inyector en lugar de las diferencias entre flujos de alimentación y retorno. Las pruebas realizadas con el prototipo construido demostraron garantía de repetibilidad, preci



Cotas en mm.

FIG.5-19

ESQUEMA DE SITUACION DE SONDA

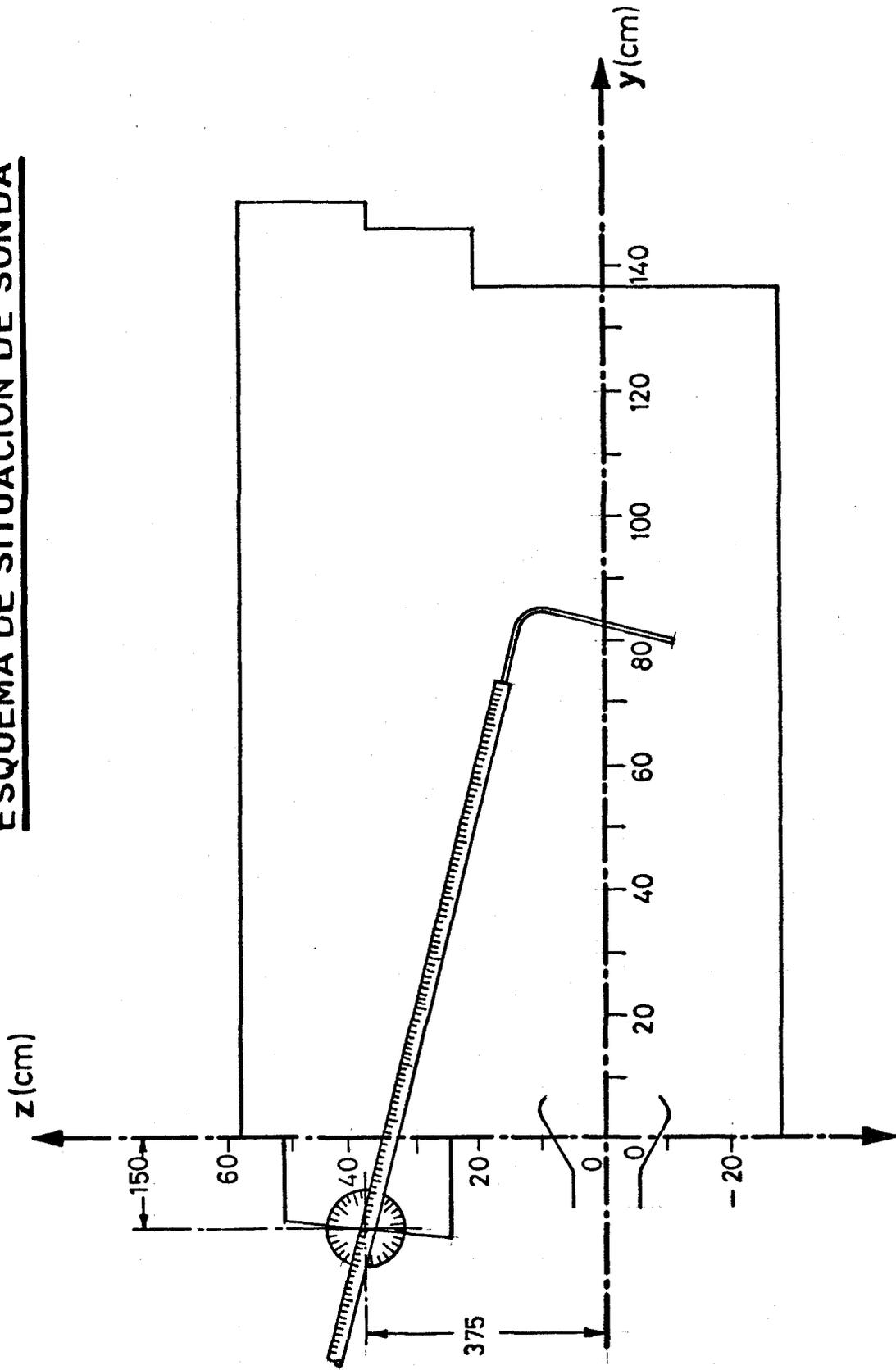


FIG.5-20

si3n y facilidad de utilizaci3n. Se considera que la construcci3n en serie de caudal3metros de este tipo proporcionar3a un instrumento de trabajo muy 3til a los equipos de vigilancia e inspecci3n de generadores de calor para realizar las operaciones de ajuste del r3gimen de funcionamiento 3ptimo sobre instalaciones "in situ".

En la Fig.5.21 se presenta un esquema del prototipo desarrollado y en la fotograf3a de la Fig.5.22 la configuraci3n real del mismo.

Con este prototipo se midieron los consumos con los tres tama3os de inyectar utilizados para temperatura de inyecci3n constante de 70°C en funci3n de la presi3n de inyecci3n. Los resultados de estos ensayos se han llevado al gr3fico de la Fig.5.23.

A partir de estas medidas de caudal y de la concentraci3n de CO₂ en los humos se determina el caudal de aire con el m3todo desarrollado en el apartado 5.5.

5.6.3 *Exploraci3n del hogar.*

En la Fig.5.20 se presenta la relaci3n entre las referencias de posicionamiento de la sonda y el sistema de ejes de referencia seleccionados para situaci3n de los puntos de muestreo y presentaci3n de resultados.

CAUDALIMETRO FUEL-OIL

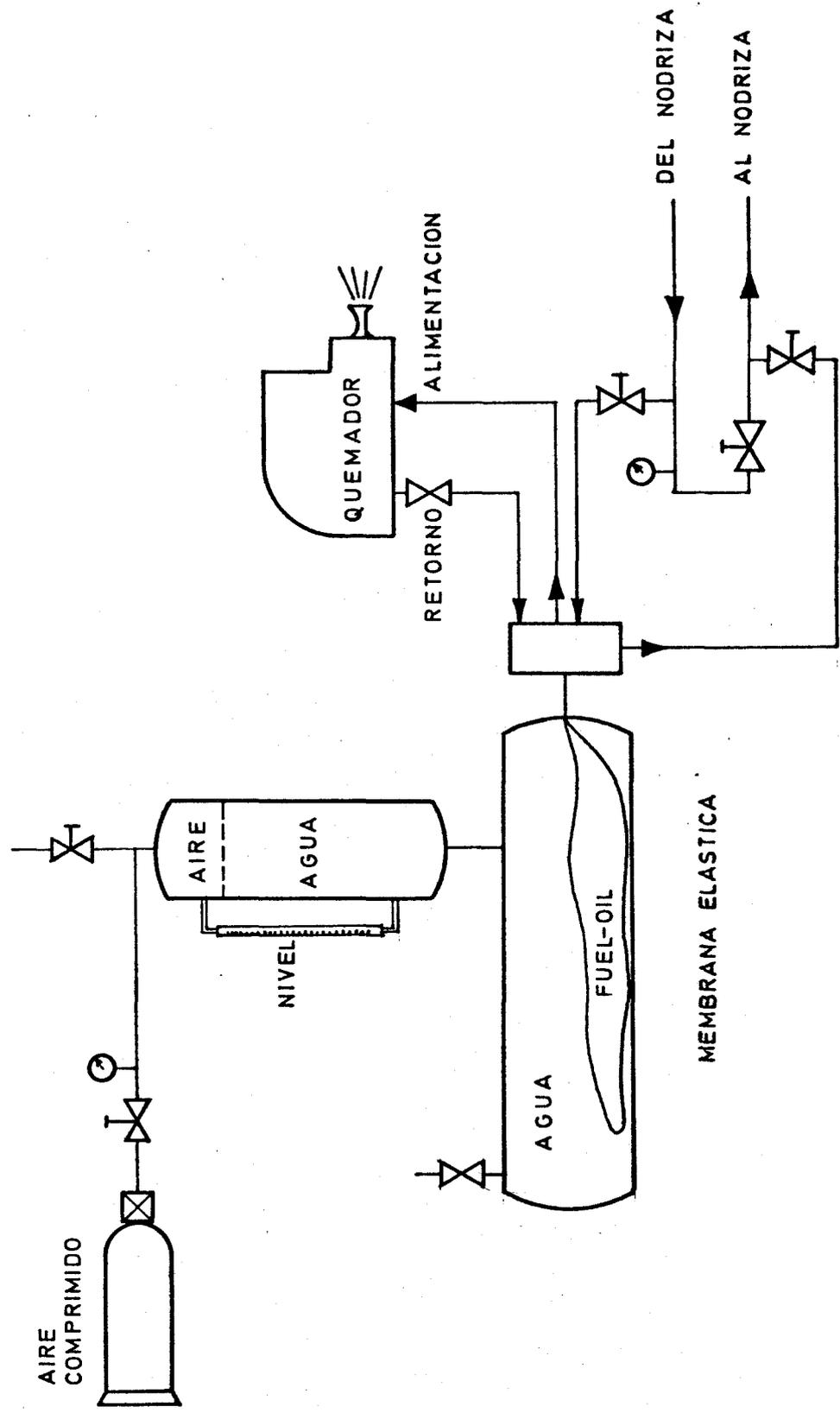


FIG. 5-21

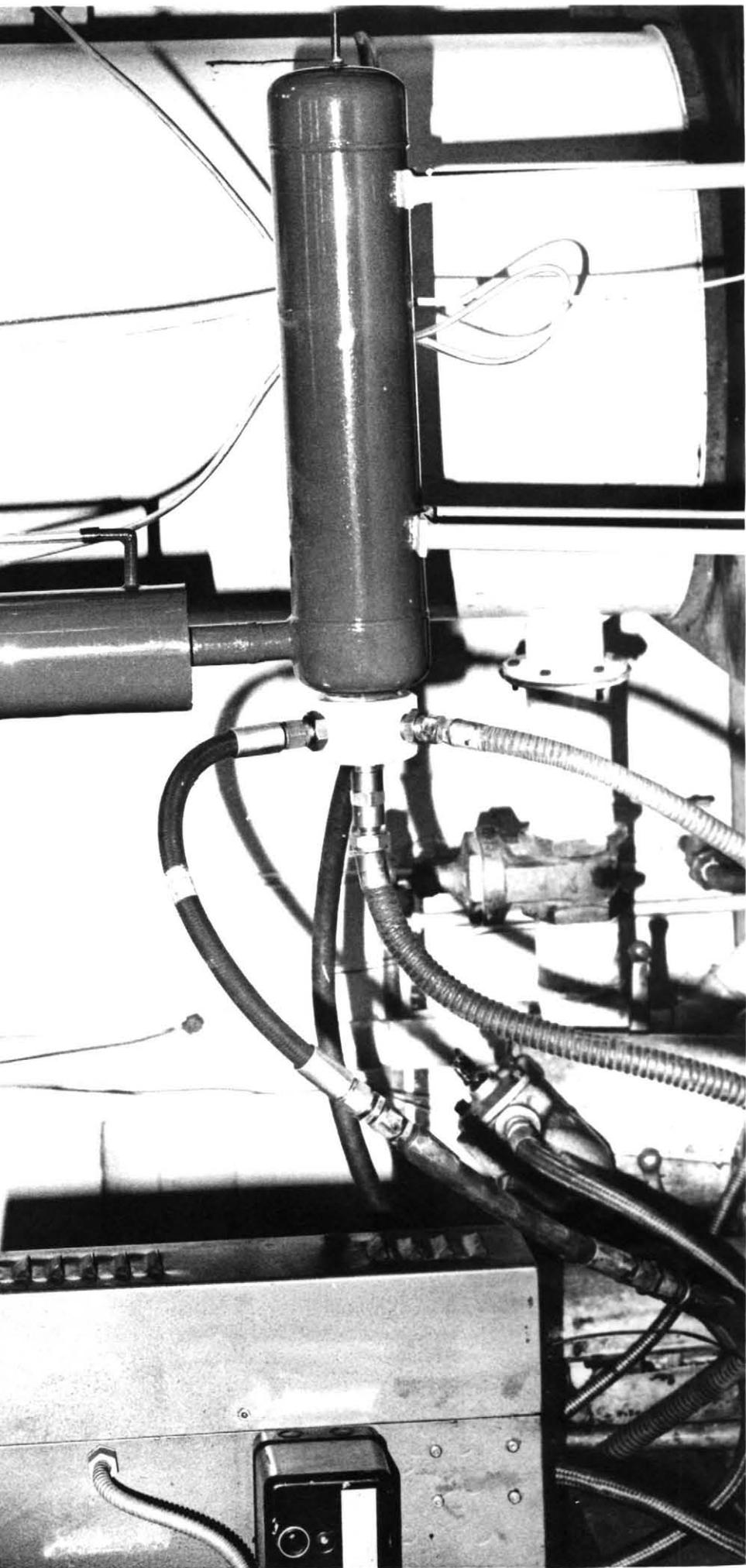


FIG. 5-22 (CAUDALÍMETRO DE FUEL)

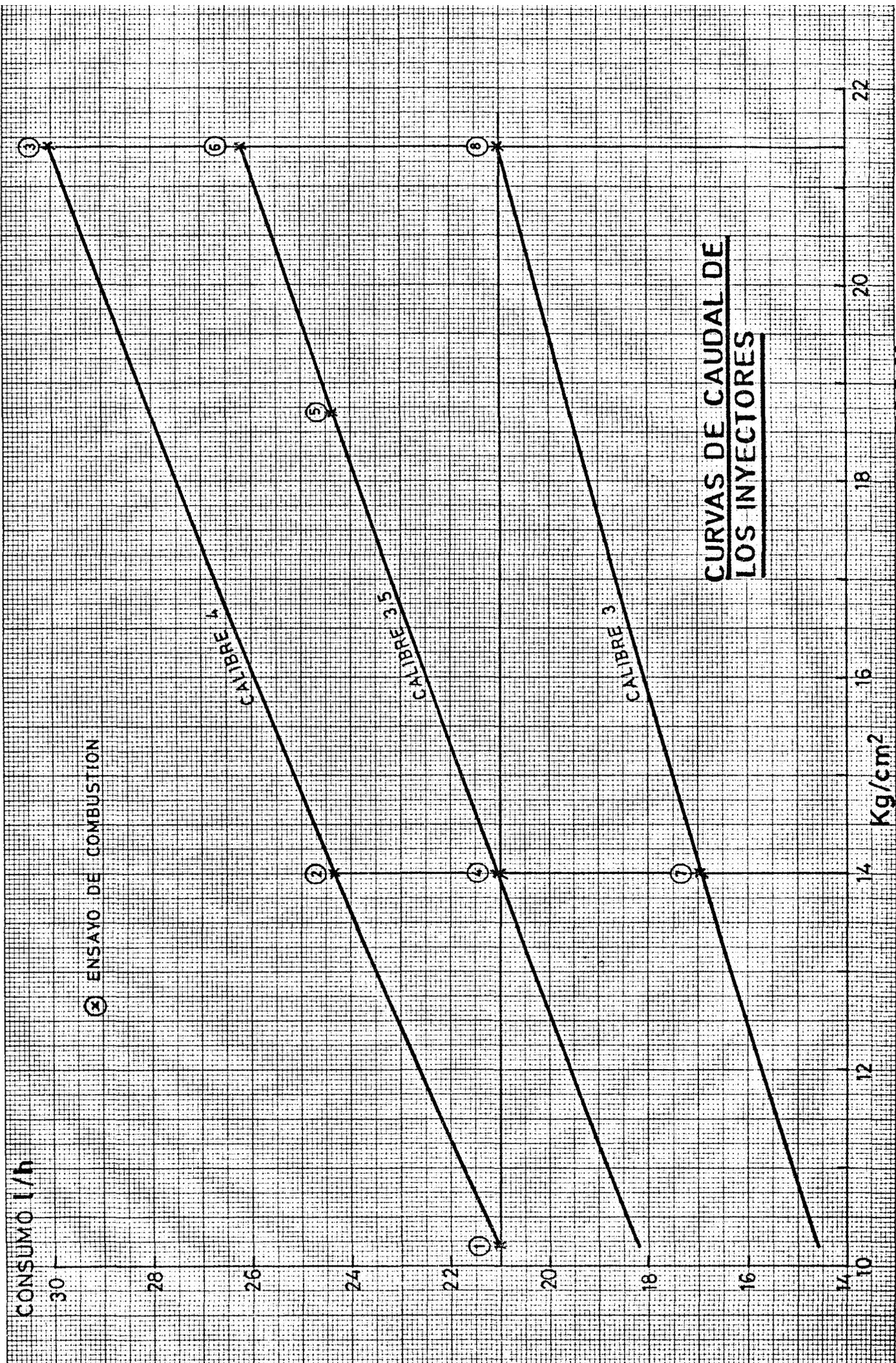


FIG.5-23

Con la exploración del hogar se ha pretendido la medición en cada uno de los puntos seleccionados para muestreo de los valores existentes de temperaturas y concentraciones de CO_2 , O_2 , SO_2 , NO , NO_2 , HC e índice de humos.

En particular, la determinación cuantitativa del índice de humos local presenta aspectos muy difíciles de resolver, tanto por el isocinetismo necesario en la toma de la sonda (prácticamente imposible de conseguir en todo punto del hogar debido a la complejidad del campo fluido), como por la formación inevitable de depósitos de partículas de hollín en la conducción desde la sonda al filtro, y por el rápido colmatado del propio filtro cuando la concentración de inquemados de la muestra es importante. No obstante, se consideró interesante realizar una exploración de concentraciones de humos en el hogar, esencialmente para definir las zonas en que se podrían presentar problemas de muestreo de otros productos por colmatado de los filtros.

En la Fig.5.24 se presenta una fotografía de los resultados obtenidos donde puede observarse la variación de la colocación de la mancha en los filtros correspondientes a los distintos puntos muestreados. En dicha fotografía puede apreciarse que existe una muy alta concentración de partículas en la llama. Durante los ensayos se observó, además, que el contenido

PLANO VERTICAL SIMETRIA (X=0)

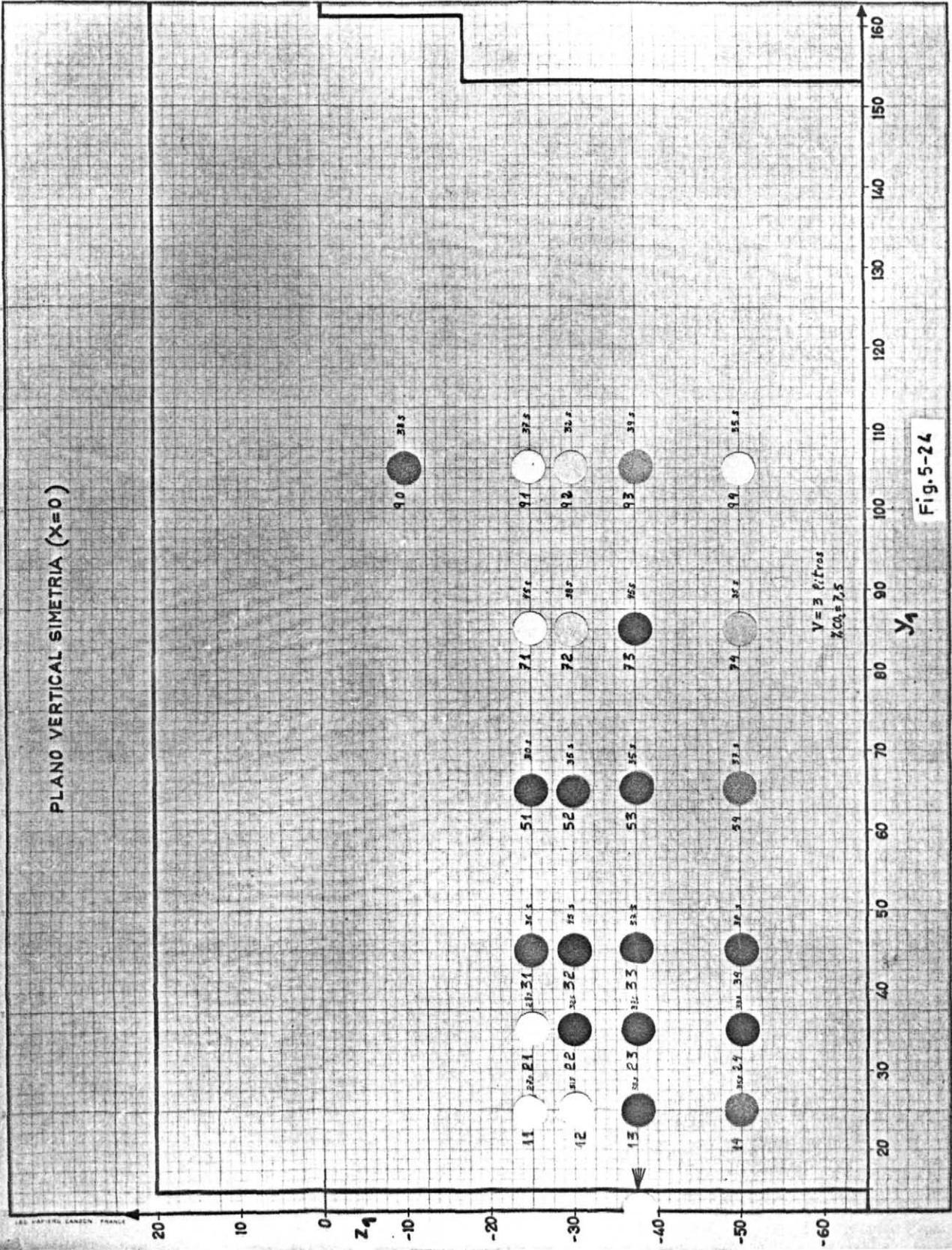


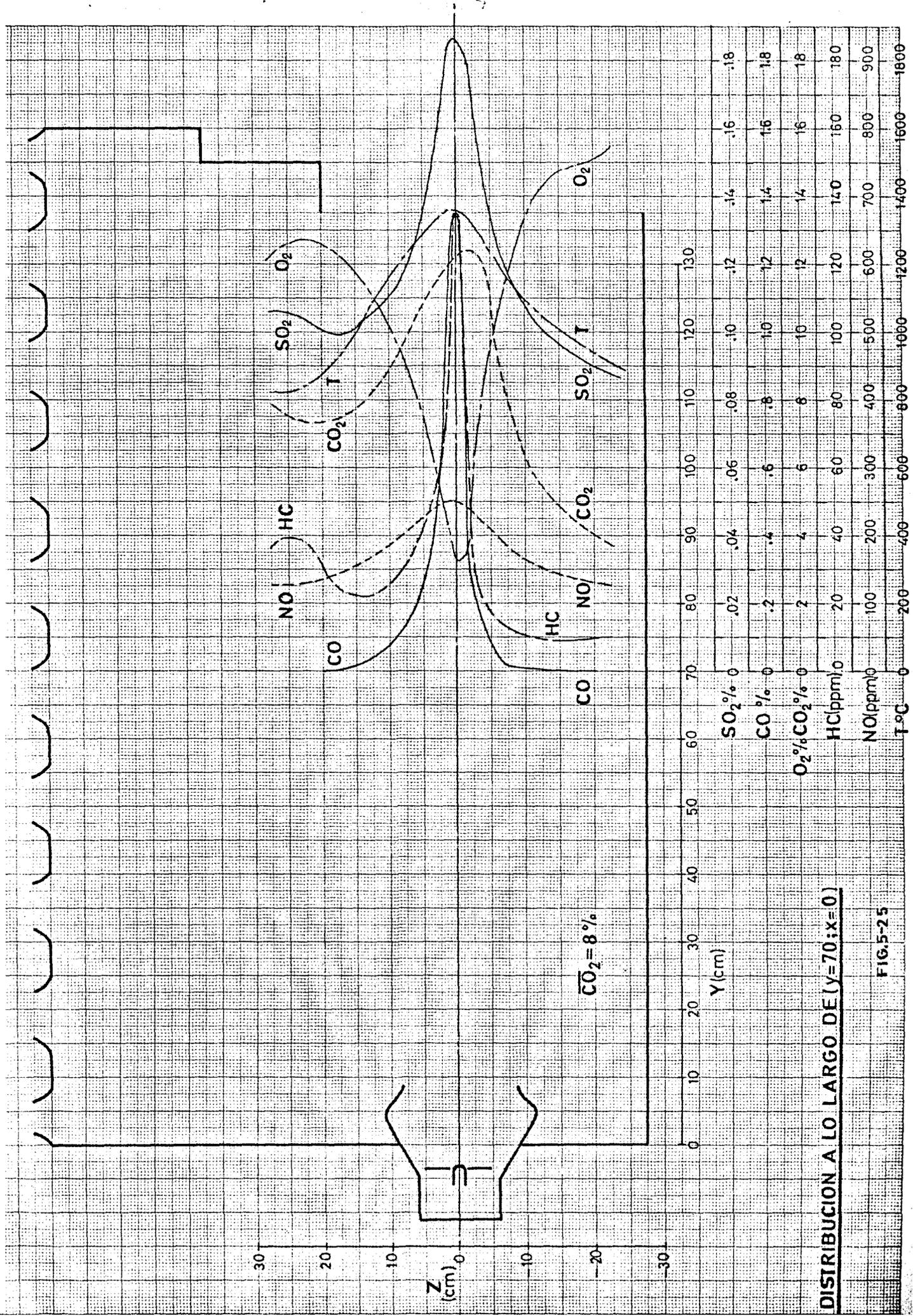
Fig. 5-24

do de partículas líquidas resultaba claramente más elevado por debajo de la llama que por encima de ella para puntos simétricamente colocados respecto al eje horizontal ($Z = 0$); lo que indica la existencia de una cierta estratificación de la concentración del fuel-oil pulverizado, debido a su densidad mayor que la de los gases de la cámara. Esta estratificación es un síntoma de escasa turbulencia en el hogar y falta de recirculación, problema que podría resolverse aumentando el grado de "swirl" de la corriente de aire de alimentación, modificando el estabilizador de llama del quemador.

Además de la indicación cualitativa de la distribución de índices de humos, esta exploración demostró que excepto en regiones muy próximas al inyector no se presentarían problemas de colmatado de filtros incluso para tiempos de muestreo razonablemente largos.

Una exploración previa realizada en los planos $Y = 40$ cm e $Y = 70$ cm, demostró la existencia de una simetría casi perfecta de temperaturas y concentraciones respecto al plano vertical que contiene al eje del inyector (plano $X = 0$) por lo que el muestreo definitivo se limitó a la exploración en dicho plano.

En la Fig.5.25 se presentan las distribuciones obtenidas en la sección vertical $Y = 70$ (que corresponde, aproximada-



DISTRIBUCION A LO LARGO DE (y=70; x=0)

mente, a la mitad de longitud de llama), de las temperaturas y concentraciones de productos de combustión para las siguientes condiciones de regulación:

Inyector calibre núm. 4.

Presión de inyección = 16 Kg/cm²

Consumo = 25,9 l/h.

Temperatura del fuel = 70°C.

CO₂ en caja de humos = 8%

$\lambda = 1,9$.

Intencionadamente se seleccionó un exceso de aire importante en estos ensayos para obtener suficiente resolución en las medidas sin problemas de exagerados depósitos por combustión incompleta.

En la Fig.5.25 se observa claramente que, todos los componentes presentan variaciones muy abruptas transversalmente a la llama. Las concentraciones de inquemados CO y HC presentan configuraciones semejantes con máximos muy acusados en el eje de la llama. El SO₂, que puede considerarse como un indicador trazador de la distribución espacial del combustible, presenta igualmente un máximo acusado en el eje. De la misma forma que el SO₂, varía el CO₂, indicador de la relación aire/combustible, juntamente con el O₂ que varía de forma lógicamente inversa. En cuanto a la distribución de NO sigue una evolución sen

siblemente paralela a la de temperaturas. Todas las distribuciones presentan una configuración casi simétrica respecto al eje del inyector excepto que por encima de la llama se aprecian algunas irregularidades que provienen de la presencia de efectos de recirculación.

La configuración de todas las curvas indica la estructura típica de una llama de difusión lo que significa que el efecto de premezcla en la zona primaria de reacción provocado por el estabilizador de llama es relativamente pobre, porque el acceso de oxígeno del aire al núcleo de la llama se realiza con dificultad, lo cual corrobora los resultados obtenidos en la medición de humos antes citada. Un sistema de estabilizador de llama que provocara mayor aporte de aire al interior del cono de inyección daría como resultados una llama más corta y una combustión más eficiente.

El paralelismo evidente de las concentraciones de NO_x con las temperaturas juntamente con el interés específico en el mecanismo de formación de NO_x , aconsejó la realización de una exploración completa del plano vertical de simetría del hogar ($X = 0$) midiendo exclusivamente NO_x y T. Se midieron los perfiles correspondientes a las secciones verticales $Y = 20, 30, 40, 50, 60, 70$ y 90 que se representan en las figuras 5.26 y 5.27. Las mediciones de NO_x reflejaron siempre cantidades inapreciables de NO_2 y los valores de NO que se presentan en la

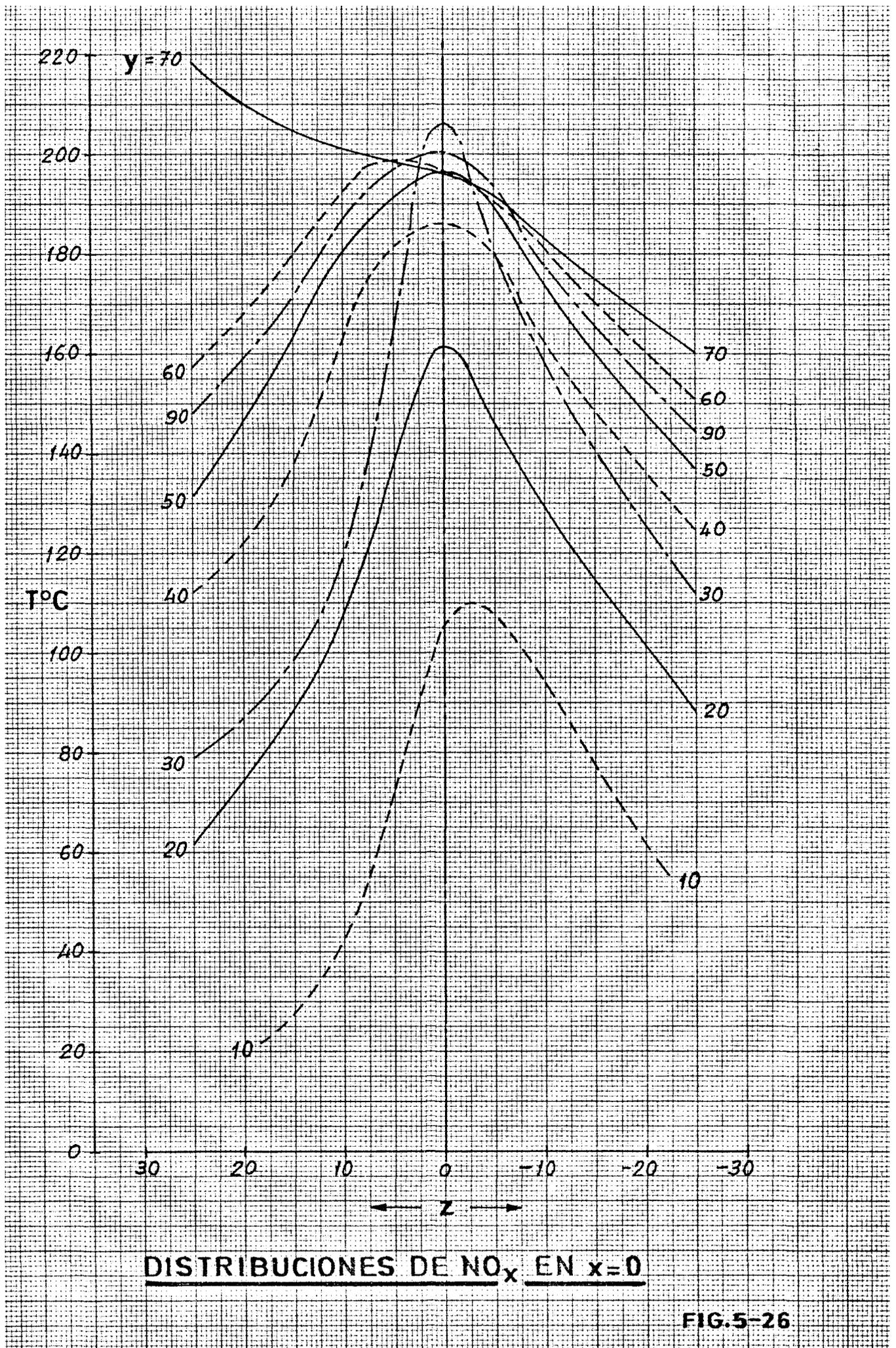
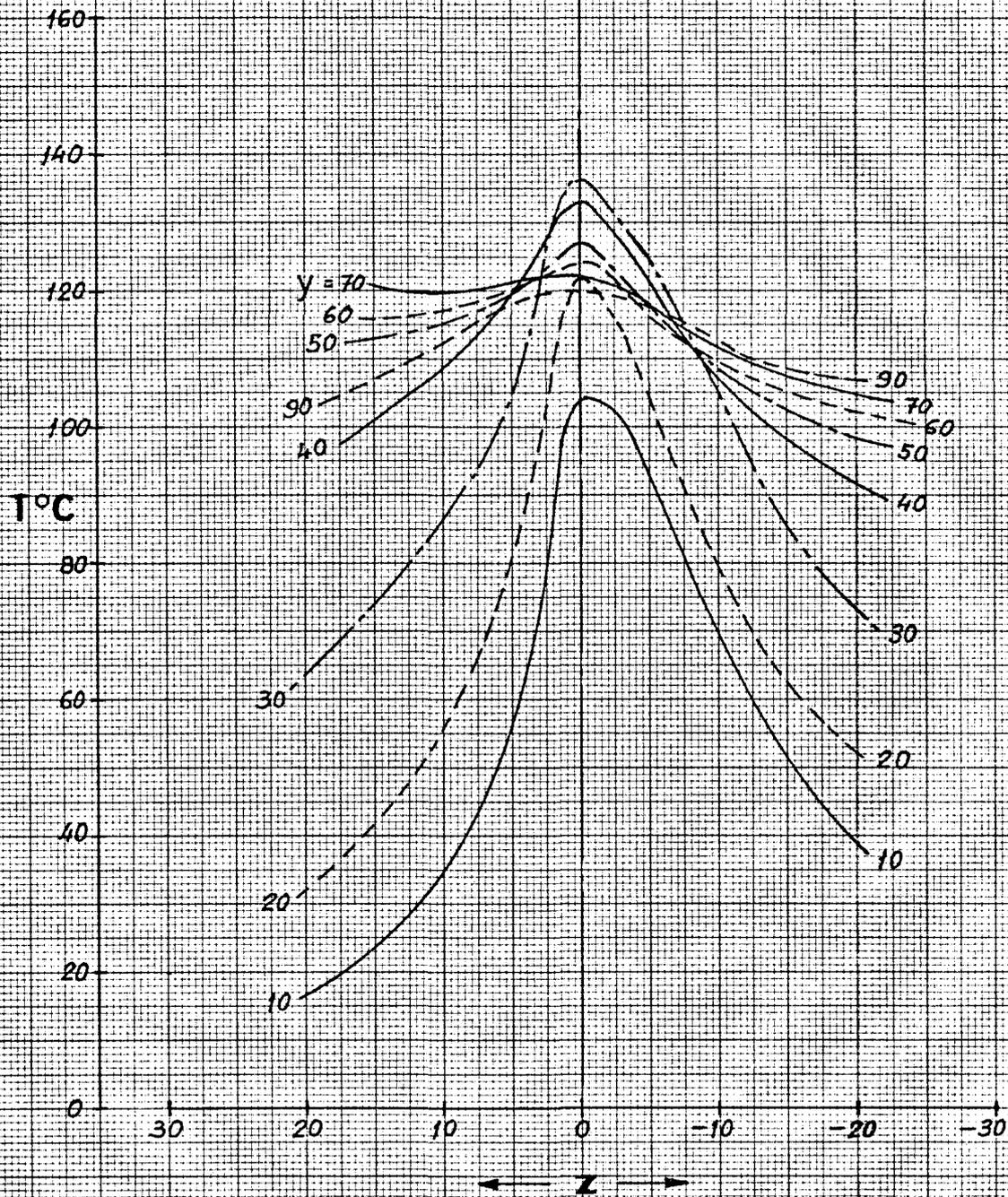


FIG.5-26



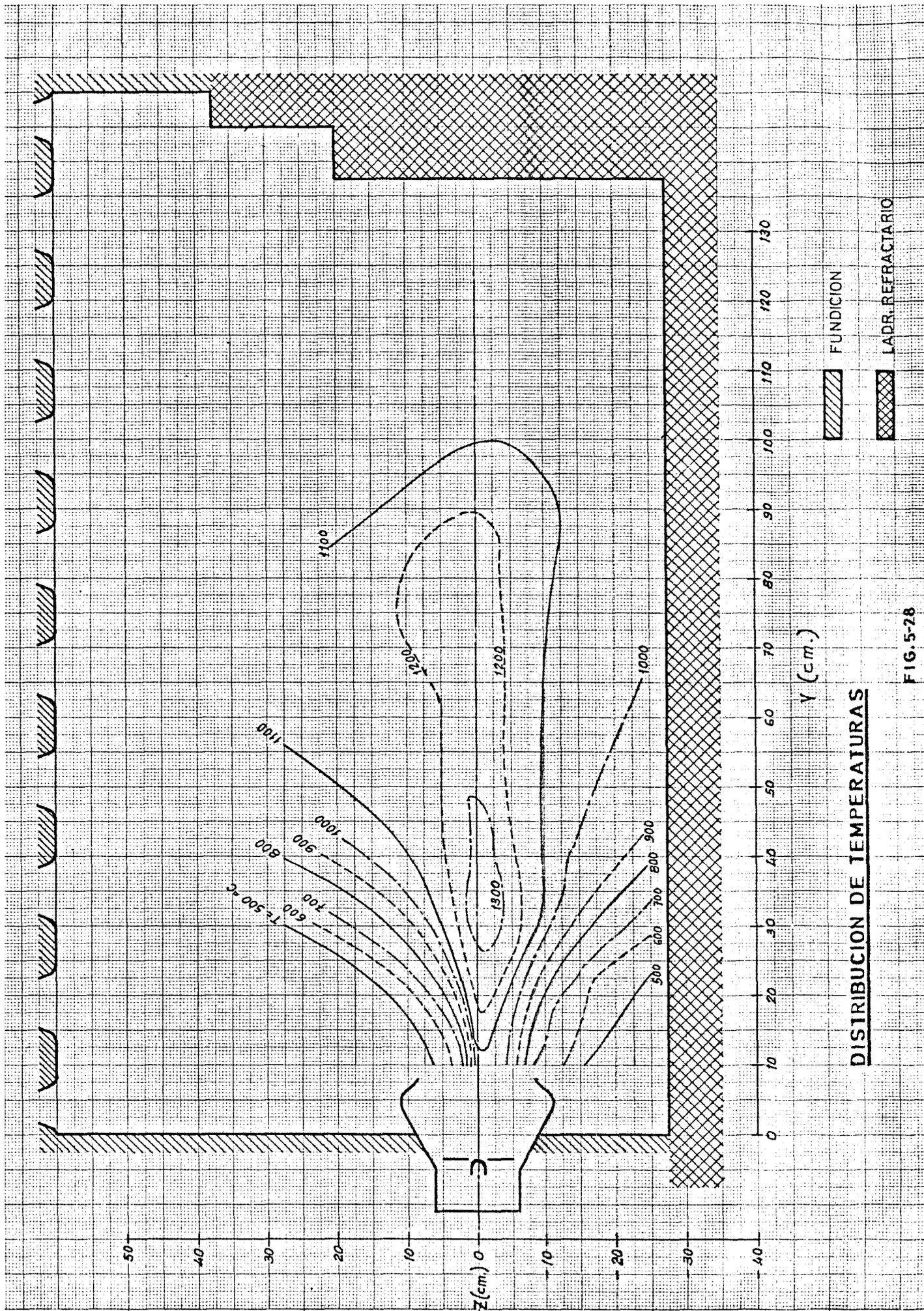
DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURAS
EN $x=0$

FIG. 5-27

Fig.5.26 como NO_x .

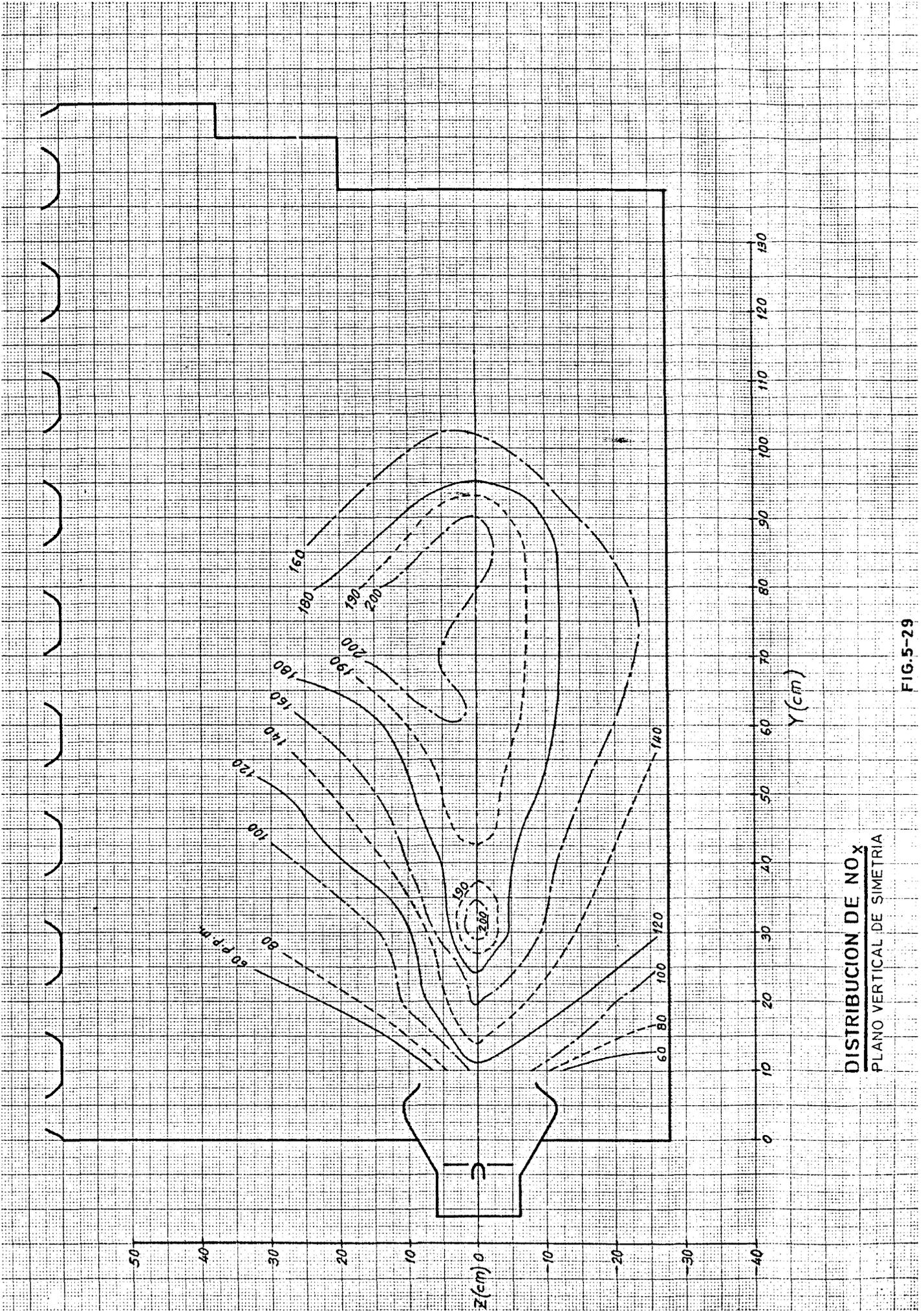
A partir de los valores medidos se han representado las líneas isoterma en la Fig.5.28 y las de igual concentración de NO_x en la Fig.5.29. Como se ve, los gradientes de temperatura presentan una configuración muy abrupta en la región próxima al inyector correspondiente a la zona primaria de combustión, y se van suavizando hacia adentro en la zona de combustión secundaria donde la combustión está gobernada por el proceso de difusión. Así resulta que la distribución global de temperaturas es semejante a la de una llama típica de difusión, con la única excepción de que se presentan los valores más elevados de las temperaturas siempre en el eje de la llama lo que se debe al efecto de premezcla originado por el aire primario.

La comparación de las figuras 5.28 y 5.29 demuestra una similitud muy fuerte de los campos de temperaturas y concentraciones de NO_x , lo que condujo a la idea de obtener una correlación entre ambos parámetros. Así con los valores de las Figs. 5.26 y 5.27, y con los de multitud de mediciones realizadas a este respecto se representó la Fig.5.30 en la que se ve que todas las mediciones se encuentran dentro de una zona estrecha que define $\text{NO} = f(T)$. Esta correlación parece indicar que la formación de NO es muy rápida, y el valor de su concentración depende esencialmente de la temperatura local siendo en primera aproximación independiente de la historia anterior de la re



DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS

FIG. 5-28



DISTRIBUCION DE NO_x
PLANO VERTICAL DE SIMETRIA

FIG. 5-29

NO (vpm)

280

240

200

160

120

80

40

0

CORRELACION NO=f(T)

MEDIDAS EN
CAJA DE HUMOS x

MEDIDAS
EN HOGAR

T°C

100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100 1200 1300 1400

FIG.5-30

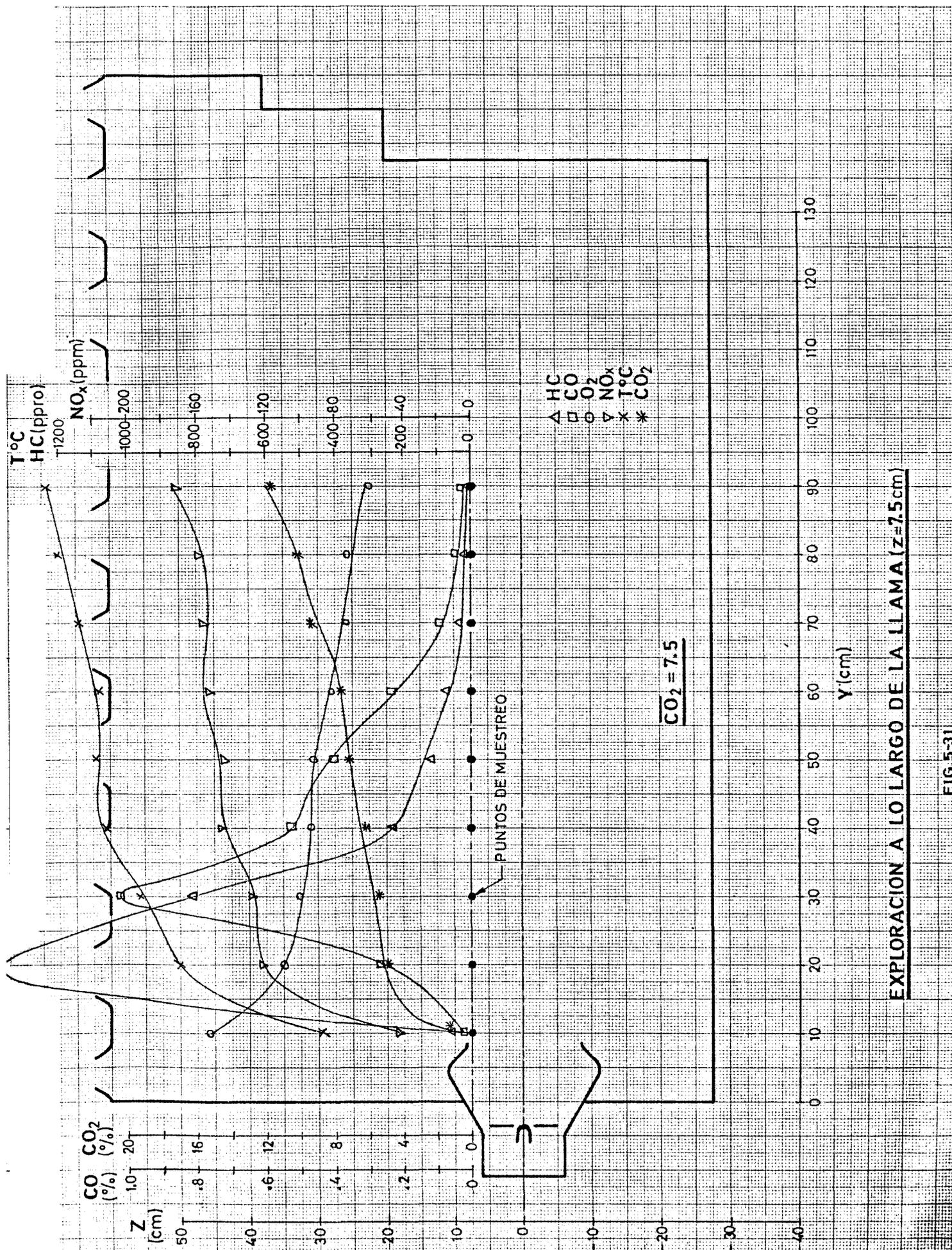
acción e incluso de la concentración local de O_2 . Este resultado es especialmente interesante y concuerda con el presentado por Fenimore en su teoría de formación del denominado "NO súbito".

Sobre el mismo gráfico de la Fig.5.30 se han representado los valores medidos en chimenea (caja de humos) durante los ensayos correspondientes a las medidas anteriormente tratadas. Estos valores son representativos de las concentraciones medias obtenidas una vez finalizada la combustión, y se ha comprobado con mediciones realizadas a lo largo de la chimenea y en su salida, que sensiblemente coinciden con las concentraciones de emisión. Se observa que todos los valores correspondientes a caja de humos están por encima de la correspondiente a la correlación $NO = f(T)$ obtenida en el hogar, y ya no se presenta una correlación clara entre NO y T. Este hecho indica que las reacciones de recombinación del NO son mucho más lentas que las de formación; es decir, que el NO una vez formado, queda prácticamente congelado y no se destruye, o se destruye muy lentamente durante el enfriamiento posterior. Como conclusión práctica de todo lo expuesto se deduce que para minimizar la emisión de NO_x en la combustión de este tipo de fuentes, conviene que la llama presente perfiles de temperaturas lo más planos posible de forma que las temperaturas máximas en el hogar se mantengan próximas a la media.

La exploración del hogar se completó con una prospección a lo largo de una línea paralela al eje de la llama a la cota $Z = 7.5$ cm con objeto de analizar la evolución de las reacciones en sentido axial a lo largo de la llama.

Los resultados se presentan en la Fig.5.31 en la que pueden observarse los altos gradientes que las concentraciones de todos los componentes presentan cerca de la descarga del quemador en la zona de combustión primaria. Los hidrocarburos no quemados crecen bruscamente inmediatamente después de la descarga como consecuencia de la elevada vaporización en la zona (el analizador sólo registra hidrocarburos en fase gaseosa), para volver a decrecer rápidamente por oxidación. El CO presenta una configuración muy semejante pero lógicamente retrasada, ya que significa la aparición de una zona de combustión incompleta inmediatamente después de la región de alta concentración de hidrocarburos, la desaparición progresiva del CO se realiza a medida que se va disponiendo de O_2 suficiente para su oxidación a CO_2 , lo que concuerda claramente con la evolución descendente de O_2 y con el crecimiento progresivo del CO_2 .

La temperatura aumenta continuamente a lo largo de la llama como consecuencia del progreso de las reacciones de combustión, y vuelve a notarse el paralelismo de su evolución con la de los óxidos de nitrógeno de acuerdo con los resultados ya



EXPLORACION A LO LARGO DE LA LLAMA (z=7.5cm)

discutidos de las exploraciones anteriormente expuestas. En ambos se aprecia un fuerte gradiente en la zona de combustión primaria seguido de un crecimiento más lento pero continuo a lo largo de la zona secundaria.

5.7 Análisis del comportamiento global en estacionario. Definición de un método racional de regulación

El problema de selección del régimen de funcionamiento óptimo de una fuente fija de combustión requiere la definición previa de las variables de regulación y el conocimiento de los efectos que estas variables tienen sobre las actuaciones de la planta.

Una fuente fija de combustión está compuesta de un hogar determinado acoplado a un sistema de eyección de gases también dado y equipado con un quemador igualmente determinado, que se va a alimentar con un fuel-oil y a una temperatura de inyección especificados por el constructor del quemador.

En estas condiciones existen tres variables de regulación principales:

1º) El diámetro del inyector D_i que en primera aproximación se seleccionará para el acoplamiento de la potencia de carga al volumen de caldera.

2º) La presión de inyección P_i que juntamente con el diáme-

tro del inyector define la potencia de carga.

3°) La relación aire/combustible que para una potencia de carga dada se variará ajustando el gasto de aire.

Con una instalación de este tipo se desea siempre obtener la máxima transmisión de calor al fluido de utilización con el mínimo consumo de combustible; esto es, se pretende maximizar la potencia de carga seleccionando el punto de funcionamiento de forma que se obtenga un rendimiento total elevado.

Estas pretensiones, si no se tienen en cuenta otros criterios pueden llevar a seleccionar regímenes de funcionamiento susceptibles de provocar alta contaminación.

Elevar la potencia de carga del hogar significa el empleo de altas densidades de combustión, que solamente serán tolerables si la cámara de combustión responde a diseño y tecnología suficientemente desarrollados, y la forma y dimensiones de la llama son apropiadas ya que en, otro caso, la proximidad de zonas de llama a paredes frías conduciría a formaciones elevadas de inquemados.

Por otra parte, el ajuste de aire para obtener máximo rendimiento conduciría a funcionar con excesos de aire muy pequeños; lo que a su vez provocaría alta formación de contaminantes.

La selección del régimen óptimo deberá basarse entonces

en criterios de compromiso entre la obtención de elevado rendimiento y concentraciones suficientemente pequeñas de contaminantes en la emisión. A la definición de estos criterios se ha dirigido esta parte del trabajo experimental.

En una fuente estacionaria de combustión se pretende transmitir el calor potencial del combustible (entalpía química), bien a un fluido de calefacción que se utilizará como vehículo del calor al punto de utilización o bien directamente a una cierta materia que se desea transformar física o químicamente. En realidad, existen dos procesos parciales; el proceso de combustión transformador de la entalpía química en entalpía sensible de los productos de combustión, y el proceso de transmisión de calor al fluido de calefacción o utilización.

Ambos procesos pueden tener lugar en dos fases sucesivas y claramente diferenciadas o simultáneamente; según el tipo de fuente fija, pero, en cualquier caso, se pueden definir los rendimientos parciales de ambos procesos cuyo producto será el rendimiento total del sistema.

Así siendo:

- H_u el calor potencial del combustible inyectado (Potencia de carga)
- π_i las pérdidas de calor por inquemados (calor potencial de los inquemados (calor potencial de los inquemados formados por unidad de tiempo)).

El rendimiento de la combustión será:

$$\eta_q = \frac{H_u - \pi_i}{H_u} = 1 - \frac{\pi_i}{H_u}$$

Despreciando los depósitos de inquemados en las paredes del sistema de eyección y admitiendo que no existen reacciones químicas posteriores a la combustión en el hogar, el incremento de entalpía sensible por unidad de tiempo en los gases de combustión ha sido $P_q = (H_u - \pi_i)$.

Esta entalpía sensible es el calor que se pretende transmitir por unidad de tiempo en la fase de intercambio de calor al fluido de utilización como potencia útil; sin embargo, una parte del mismo se pierde a través de las paredes del sistema, y otra debido a que los humos se eyectan por la chimenea a temperatura muy superior a la ambiente.

Llamando:

π_p a la pérdida de potencia calorífica a través de las paredes

π_h a la pérdida de potencia calorífica asociada a los humos calientes el rendimiento de la fase de intercambio de calor será:

$$\eta_{cc} = \frac{P_q - \pi_p - \pi_h}{P_q} = 1 - \frac{\pi_p + \pi_h}{P_q}$$

El rendimiento total del sistema generador de calor será:

$$\eta_t = \eta_q + \eta_{cc} = 1 - \frac{\pi_i + \pi_p + \pi_h}{H_u}$$

Donde se evidencia que el rendimiento total de la planta disminuye cuando aumentan las pérdidas por inquemados, y por las paredes y el calor sensible asociado a la masa de gases eyectada al exterior.

El valor de estos rendimientos para un sistema combustor determinado dependerá del régimen de funcionamiento.

Definir un régimen de funcionamiento significa conocer los valores de todas las variables funcionales del sistema (consumo de combustible, presión y temperatura de inyección, gasto de aire, presión y temperatura del aire ambiente, depresión en el hogar, flujo y temperatura del fluido de utilización...etc.) La influencia relativa de cada una de estas variables depende de cada caso particular, pero, en general, las variables esenciales son: la potencia de carga, la relación aire/combustible y la presión de inyección.

Para la evaluación cuantitativa de las pérdidas por inquemados habría que determinar las concentraciones en el hogar de todos los productos de combustión y los poderes caloríficos de cada uno de los componentes. Los resultados de la exploración de llama en el hogar, expuestos en el apartado anterior, muestran que suficientemente lejos de la llama con excesos de

aire moderados aparecen siempre concentraciones muy pequeñas de CO y de hidrocarburos en fase gaseosa por lo que en la emisión hay que esperar concentraciones despreciables de estos componentes. Las medidas realizadas en caja de humos y en chimenea evidenciaron este hecho. Por otra parte, la composición de los inquemados en forma de partículas es muy variable, de forma que la evaluación precisa de su poder calorífico es prácticamente imposible y, por tanto, se hace difícil la determinación cuantitativa de las pérdidas por inquemados. Sin embargo, se puede adoptar un poder calorífico medio de los hollines, con lo que para una estimación cualitativa, se puede admitir el índice de Bacharach como indicativo de las pérdidas por inquemados.

Las pérdidas de calor por las paredes dependen de la configuración de los componentes de la planta, de la temperatura de sus superficies exteriores, y de la del ambiente en que se encuentra ubicada. Puesto que estas pérdidas pueden minimizarse con un aislamiento térmico suficiente, y no estén ligadas con la forma de realizarse la combustión, no se ha considerado en este trabajo, lo que equivale a suponer que el hogar esté perfectamente aislado del exterior.

En cuanto a las pérdidas por calor de los humos, su evaluación es simple, hasta conocer el gasto composición y temperatura de los humos.

De acuerdo con lo expuesto se han realizado ensayos en la planta experimental descrita en el apartado 5.6, con tres calibres de inyectores distintos denominados calibre 3, 3,5 y 4 de diámetros de orificio 0,52, 0,56 y 0,60 mm respectivamente.

Estos ensayos se han realizado seleccionando diversas presiones de inyección, y modificando el gasto de aire dejando estabilizarse la combustión antes de tomar las medidas correspondientes.

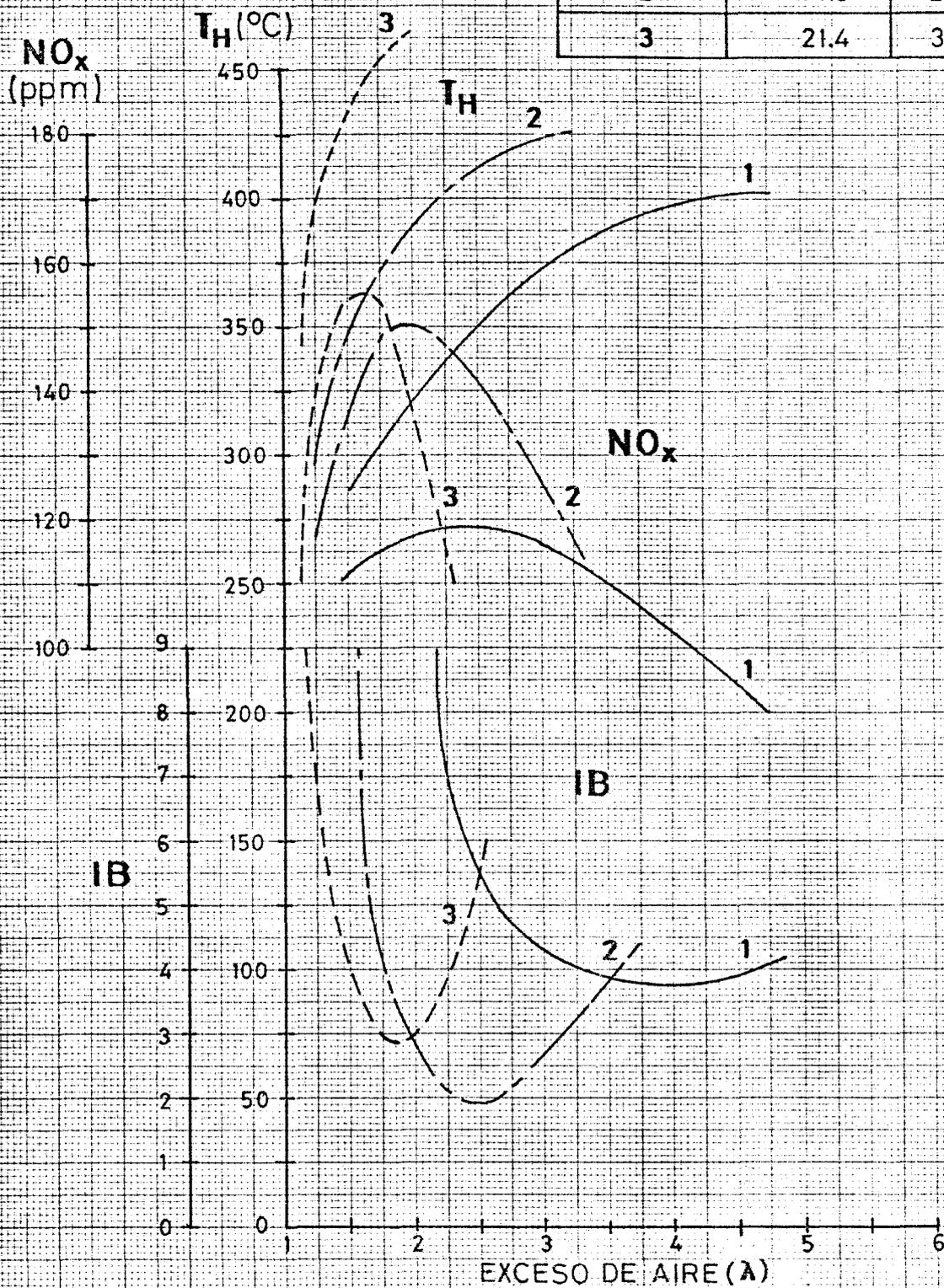
Una vez en estacionario se han registrado los valores siguientes:

Temperatura de humos en caja de humos	T_h
Índice de Bacharach	IB
Concentración de CO_2 en caja de humos	$\overline{CO_2}$
Concentración de NO_x en caja de humos	$\overline{NO_x}$

Los resultados de todas estas medidas se han representado en los gráficos de las figuras 5.32; 5.33 y 5.34. De la observación de las mismas se obtienen las siguientes conclusiones de interés:

1^a) Para todos los calibres de inyector utilizados y a toda presión de inyección de prueba existe un margen de excesos de aire en el que los IB pasan por un mínimo. Esto significa que tanto a excesos de aire muy grandes como muy pequeños los inquemados aumentan brutalmente.

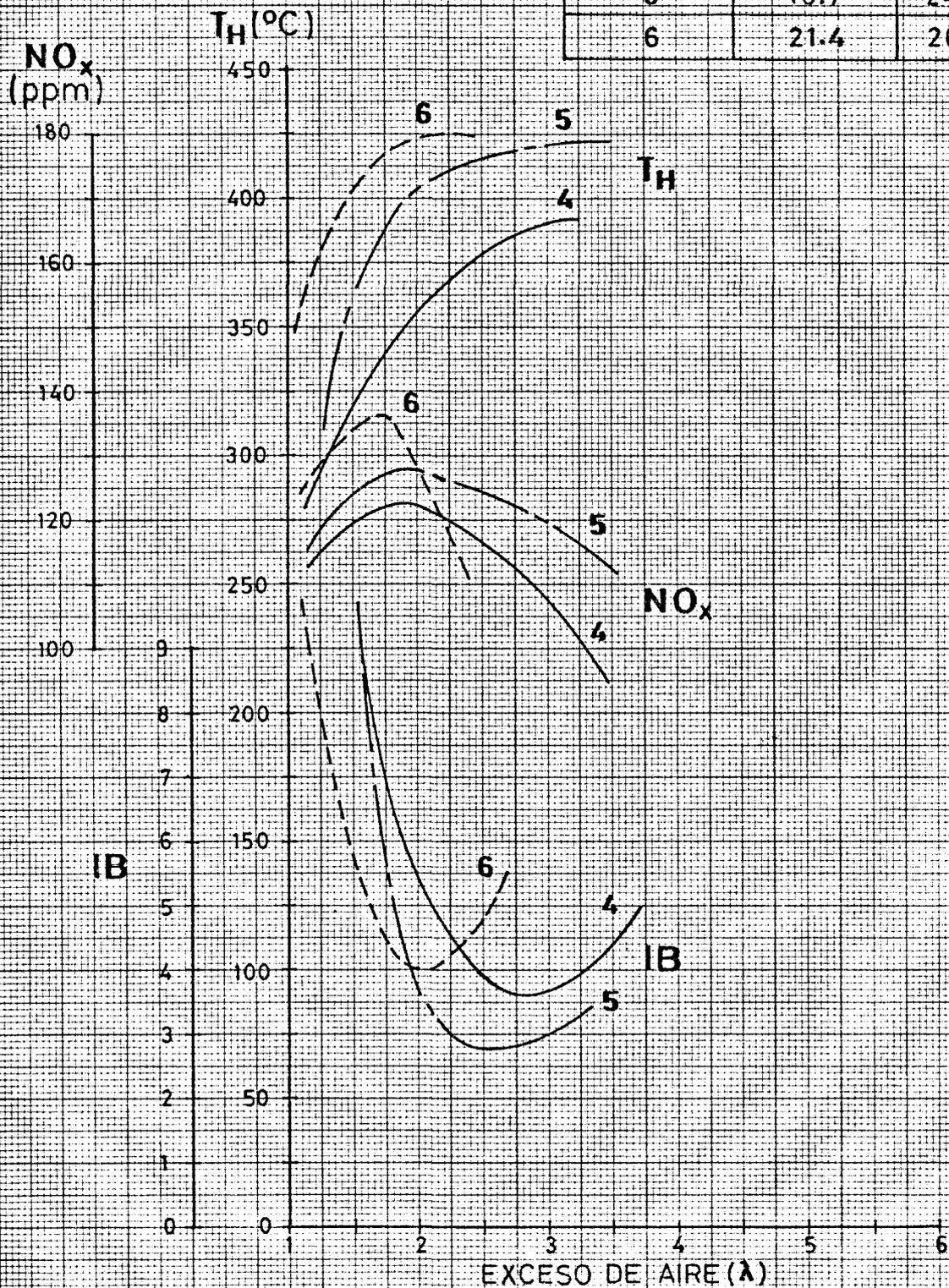
ENSAYO N°	P_i (Kg/cm ²)	c (l/h)
1	10.2	21.0
2	14.0	24.3
3	21.4	30.2



ENSAYOS CALIBRE N°4

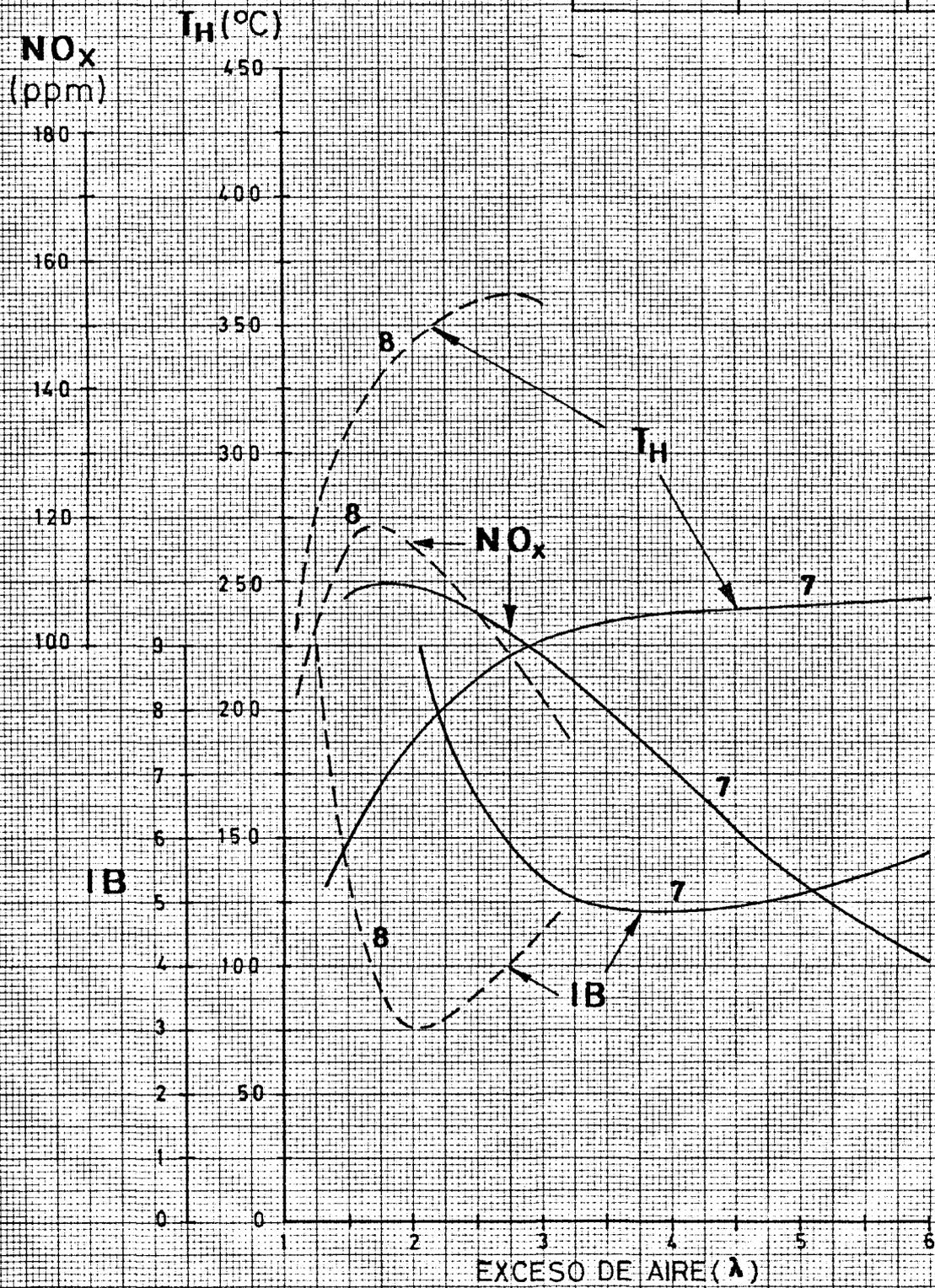
FIG.5-32

ENSAYO Nº	P_i (Kg/cm ²)	c (l/h)
4	14.0	21.0
5	18.7	24.3
6	21.4	26.2



ENSAYOS CALIBRE Nº 3.5

ENSAYO N°	P_i (Kg/cm ²)	c (l/h)
7	14.0	16.9
8	21.4	21.0



ENSAYOS CALIBRE N°3

2^a) Los óxidos de nitrógeno presentan siempre su máximo para excesos de aire algo menores que los que dan el mínimo de IB.

3^a) La temperatura de humos disminuye al disminuir el exceso de aire.

La primera conclusión indica que para todas las demás variables fijas existe un gasto de aire para el cual tanto el aporte de oxígeno como la temperatura en la zona de combustión primaria son suficientes para obtener buena vaporización y reacciones rápidas en el interior de la llama. Excesos de aire mayores contribuyen con un enfriamiento de la zona de combustión primaria que provoca una velocidad de reacción más lenta y la formación de inquemados. Excesos de aire más pequeños dan condiciones locales en el interior de la zona de reacción de escasez de oxígeno; su efecto ya no se puede compensar con el incremento local de temperatura y se incrementa nuevamente la formación de inquemados.

La segunda conclusión está relacionada con el hecho de que los óxidos de nitrógeno se forman esencialmente en las zonas de alta temperatura de la llama, y que estas temperaturas son máximas para excesos de aire algo menores que los que producen inquemados mínimos.

En cuanto a la tercera conclusión define esencialmente como es la variación de las pérdidas de calor por los humos en

función del exceso de aire, y en consecuencia la variación del rendimiento de la fase de intercambio.

Las pérdidas por los humos pueden expresarse como:

$$\pi_h = (G + C) \cdot C_{ph} \cdot (T_h - T_a) = C \cdot \left[\left(\frac{G}{C} \right)_{\text{est.}} \cdot \lambda + 1 \right] \cdot C_{ph} \cdot (T_h - T_a).$$

Siendo:

C = consumo de combustible

G = gasto de aire

C_{ph} = calor específico de los humos

T_a = temperatura ambiente del aire a la entrada.

En esta expresión se ve que las pérdidas por humos aumentan rápidamente al aumentar el exceso de aire por incrementarse simultáneamente λ y T_h .

En la Fig.5.35 se presenta la variación típica de las pérdidas por humos, por inquemados y totales junto con los IB en función del exceso de aire para una caldera en que se han mantenido fijas el resto de las variables.

En esta figura puede apreciarse, que las pérdidas de calor por inquemados se harán muy grandes cuando se tienen pequeños excesos de aire, por falta de oxígeno; y vuelven a crecer con excesos de aire muy grandes por combustión fría, siguiendo una evolución semejante a la de los IB. Las pérdidas de calor por humos aumentan siempre y rápidamente con los excesos de

DISTRIBUCION TIPICA DE PERDIDAS DE CALOR E IB

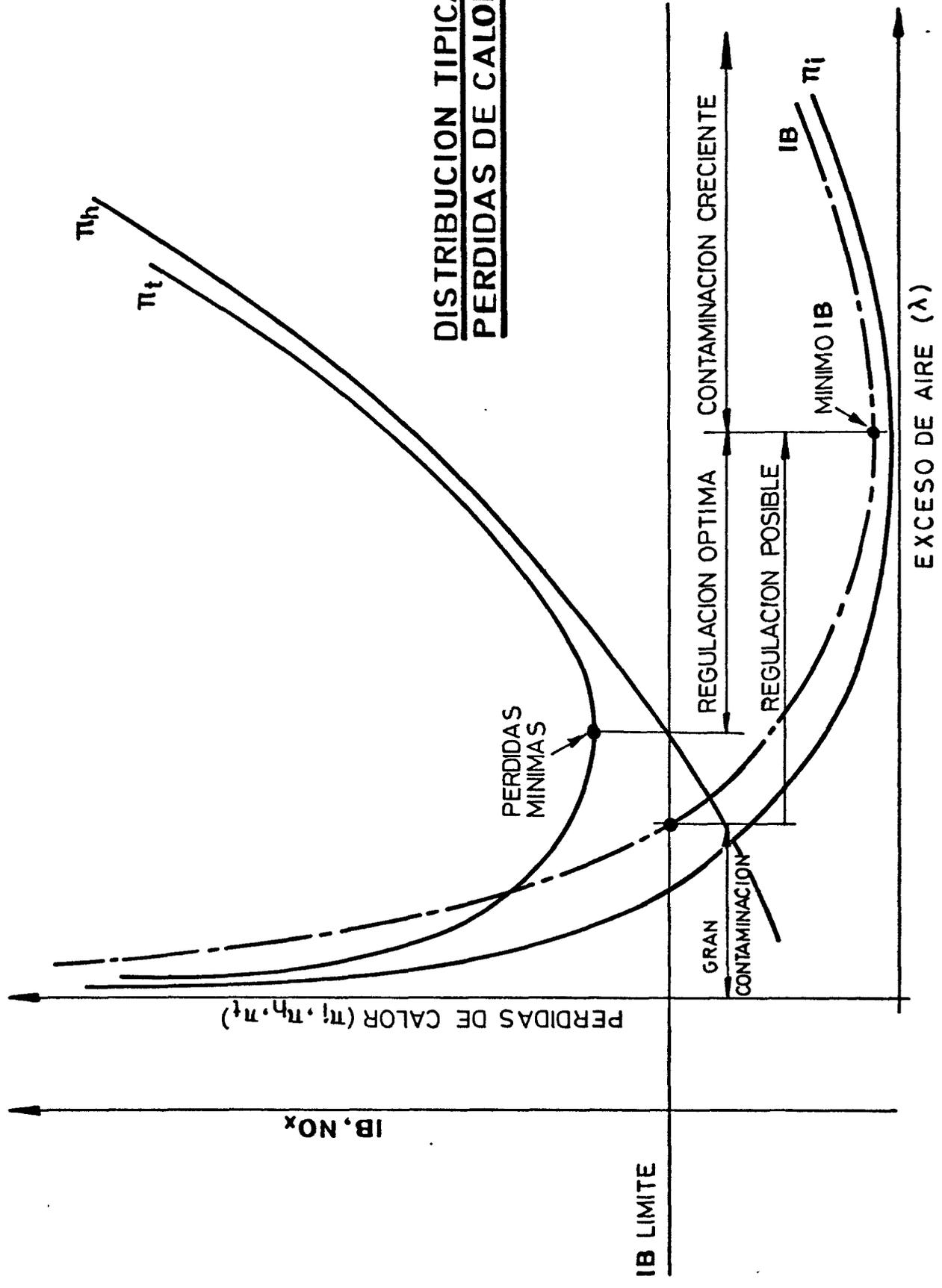


FIG.5-35

aire por el doble efecto de aumentar λ y T_h , según lo dicho anteriormente.

La suma de las pérdidas por inquemados y por humos da las pérdidas de calor totales, que pasan por un mínimo para el cual el rendimiento de la planta sería máximo. Este mínimo se presenta a valores del exceso de aire inferiores al que da mínimo IB. Este hecho justifica la tendencia general del personal de mantenimiento de este tipo de plantas (esencialmente preocupado de obtener buenos rendimientos térmicos) de reducir el exceso de aire tanto como es posible, manteniendo la chimenea "humeando" un poco.

Sin embargo, desde el punto de vista de los efectos contaminantes, esta zona de regulación es crítica porque perturbaciones funcionales o atmosféricas que disminuyan el exceso de aire pueden hacer que la planta funcione con alta contaminación. Además; en la zona de máximo rendimiento coincide sensiblemente la máxima formación de óxidos de nitrógeno.

De todo esto se deduce que el punto de regulación racional para mantener un rendimiento aceptable sin alta contaminación debe situarse en excesos de aire algo superiores al de máximo rendimiento.

Puede tomarse entonces, como "zona posible de regulación" la comprendida entre el valor de que dé el límite permitido por la Administración para IB y el que proporcione el va-

lor mínimo de IB. Dentro de este intervalo se fijará el punto de funcionamiento, tomando un margen de seguridad suficiente en el exceso de aire, para garantizar que las siempre posibles variaciones de las condiciones de funcionamiento no alcancen a llevar al sistema a funcionar con un IB superior al límite permitido.

Cuando la adaptación de componentes del sistema no es correcta pueden presentarse curvas de IB que no lleguen a alcanzar valores inferiores al límite permitido en todo el campo de regulación posible de excesos de aire. Las causas que pueden dar lugar a este efecto son muy diversas: consumo de fuel excesivo, baja presión de inyección, mal reglaje del pulverizador en gasto o en ángulo, desajuste del difusor de aire, tiro desajustado, hogar con pérdidas de refractario o excesivos depósitos, combustible excesivamente viscoso, etc. Cuando se presenta esta circunstancia habrá que determinar las causas de incorrecto funcionamiento y realizar los ajustes necesarios para obtener una curva de IB con valores suficientemente bajos antes de proceder a la regulación del aire expuesta anteriormente.

Las causas que más afectan al incorrecto funcionamiento son las que producen una potencia de carga excesiva, una pulverización deficiente o una turbulencia pobre de la corriente en la zona del estabilizador de llama.

La influencia de las variables que definen estos efectos se ha analizado experimentalmente, a través de las variaciones de calibre de inyector, presión de inyección y excesos de aire objeto de los ensayos presentados en las figuras 5.32; 5.33 y 5.34.

Para un calibre constante, el caudal de combustible es sensiblemente proporcional a $\sqrt{P_i}$, de forma que al aumentar la presión de inyección crece la potencia de carga y con ella la densidad de combustión en el hogar; con lo que para el resto de efectos iguales tendería a incrementarse la formación de inquemados. Sin embargo al mismo tiempo, al aumentar P_i disminuye el tamaño de gotas; mejorándose la pulverización y, en consecuencia, el tiempo necesario para su vaporización y combustión. Por otra parte, a excesos de aire iguales, el gasto de aire se mantiene proporcional a la potencia de carga, es decir a $\sqrt{P_i}$; con lo que el incremento de la presión de inyección a exceso de aire constante significa una mayor velocidad del aire a la entrada, que provoca mejor turbulencia en la zona de combustión primaria. La turbulencia elevada mejora los efectos de transporte disminuyendo también los tiempos de combustión de las gotas y, en consecuencia, contribuye a disminuir la formación de inquemados.

En resumen, al aumentar P_i a calibre constante existen

dos efectos contrapuestos para la formación de inquemados: el incremento de la potencia de carga tenderá a aumentar la formación, mientras que el menor diámetro de gotas y la mayor turbulencia tenderían a disminuirlo.

Estos efectos parecen justificar la aparición de los IB mínimos a presiones de inyección intermedias en las figuras 5.32 y 5.33.

En estas series de ensayos se aprecia que cuando P_i crece, los mínimos de IB (buenas combustiones) se desplazan hacia los excesos de aire menores, pero al mismo tiempo las temperaturas de la llama crecen provocando una mayor formación de NO_x y una más alta temperatura de los gases de salida, lo cual afecta desfavorablemente al rendimiento total.

El aspecto singular de las curvas correspondientes a $P_i = 14 \text{ Kg/cm}^2$ de la Fig.5.34 indica que a potencias de carga muy bajas se presentan temperaturas de llama reducidas con baja turbulencia, con lo que la combustión en la zona primaria se hace muy imperfecta.

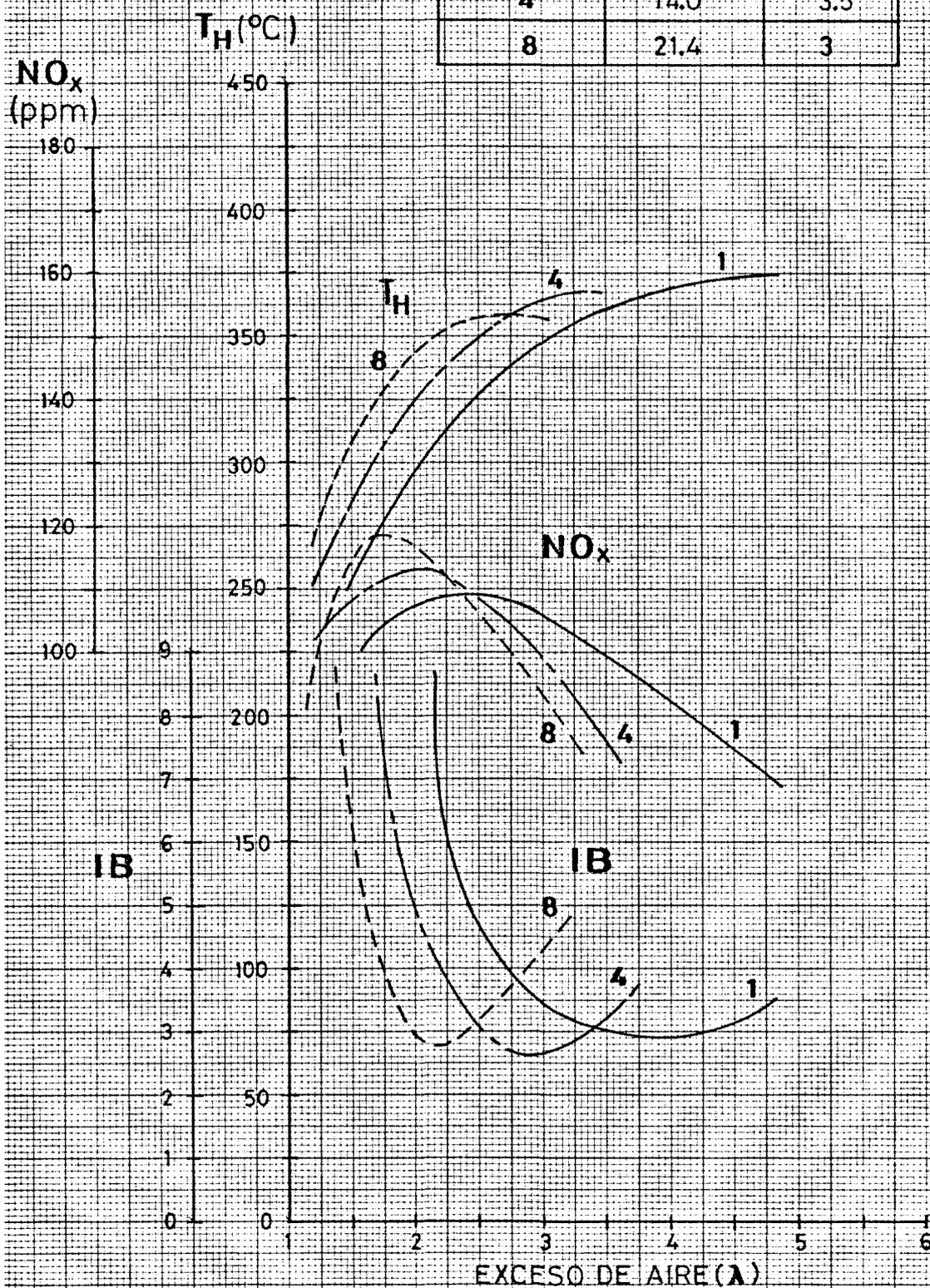
En la figura 5.36 se han superpuesto las curvas relativas a

Calibre 3 : $P_i = 10,2 \text{ Kg/cm}^2$.

Calibre 3,5 : $P_i = 14 \text{ Kg/cm}^2$.

Calibre 4 : $P_i = 22,4 \text{ Kg/cm}^2$.

ENSAYO N°	P_1 (Kg/cm ²)	CALIBRE
1	10.2	4
4	14.0	3.5
8	21.4	3



COMPARACION A POTENCIA CONSTANTE

$c=21\text{l/h}$

que corresponden todas a un caudal de 21 l/h de fuel. En esta figura se evidencia el efecto favorable de incrementar la P_i a potencia de carga constante, el valor mínimo de IB varía muy poco pero se desplaza a los λ pequeños, lo cual afecta muy favorablemente al rendimiento ya que se tienen menores gastos de humos e incluso a temperatura ligeramente menor. Sin embargo, los NO_x crecen algo con la P_i , lo que lógicamente se debe a la mayor temperatura de llama, si bien este crecimiento no es lo suficientemente grande para considerarlo un efecto contaminante importante.

Los criterios expuestos definen el método de selección de la potencia de carga y el de P_i correspondiente a cada caso. Concretamente en nuestro caso el mejor de todos los ensayos realizados correspondería al inyector de calibre 4 con $P_i = 14 \text{ Kg/cm}^2$.

5.8 Análisis experimental de la planta en régimen transitorio

Para evidenciar los efectos contaminantes de este tipo de plantas en régimen transitorio expuestos en el apartado 5-4, se prepararon una serie de ensayos sobre la planta experimental destinados a determinar las emisiones de contaminantes y los tiempos necesarios para alcanzar las condiciones de funcionamiento estacionario después de un arranque y después de una parada.

Durante estos períodos se han registrado las evoluciones de las concentraciones de CO_2 , O_2 , NO , CO , HC y humos, así como los valores de la depresión en el hogar, temperaturas de los gases en la caja de humos y temperaturas de entrada y salida de agua en caldera. Las temperaturas del circuito de agua tienen poco significado para la generalización de conclusiones, ya que los tiempos necesarios para estabilización pueden variar muchísimo de unas instalaciones a otras por depender fuertemente de las características particulares de cada instalación; (volumen total de agua del sistema, distribución de los radiadores y temperaturas de los recintos donde estén ubicados, capacidad térmica del edificio, aislamientos, temperatura exterior... etc), pero concretamente en el caso de la planta ensayada las evoluciones de estas temperaturas del circuito de agua han resultado muy lentas conduciendo a tiempos de estabilización en el arranque superiores a las dos horas. Aunque, como se ha dicho, estos tiempos dependen de las características de cada instalación particular, se puede admitir que para la mayor parte de instalaciones de este tipo los citados tiempos van a resultar superiores a la hora de funcionamiento.

Estos tiempos son del orden de diez veces superiores a los registrados como tiempos de estabilización del tiro y de la opacidad de humos; y muchísimo mayores que los de estabili-

zación de emisiones de contaminantes gaseosos. Este hecho demuestra que la influencia de las temperaturas del circuito de agua en el desarrollo de la combustión es despreciable.

En la Fig.5.37 se presentan las evoluciones de las magnitudes y concentraciones medidas en los siete minutos subsiguientes al arranque, tomando como instante cero el instante en que comienza la inyección de combustible. En la Fig.5.38 se presentan las mismas evoluciones durante la parada tomando como instante cero el del corte del combustible.

La evolución del tiro durante el arranque presenta una configuración creciente debido a la disminución de densidad de los humos de chimenea provocada por el incremento paulatino de su temperatura. Los tiempos necesarios para estabilización del tiro son del orden de los 15 minutos. En la misma figura se ve que la emisión de inquemados definidos por el IB presenta una evolución inversa a la del tiro, los índices de Bacharach iniciales son muy grandes, empleándose del orden de cinco minutos en bajar a valores inferiores a $IB = 4$; y del orden de 15 minutos en la estabilización total a $IB = 2.1$. Para la medida de IB las muestras se han tomado con la bomba del equipo Bacharach, pero el obscurecimiento del filtro se ha medido con reflectómetro a partir de un método desarrollado en el Laboratorio que proporciona perfecta correlación entre las escalas

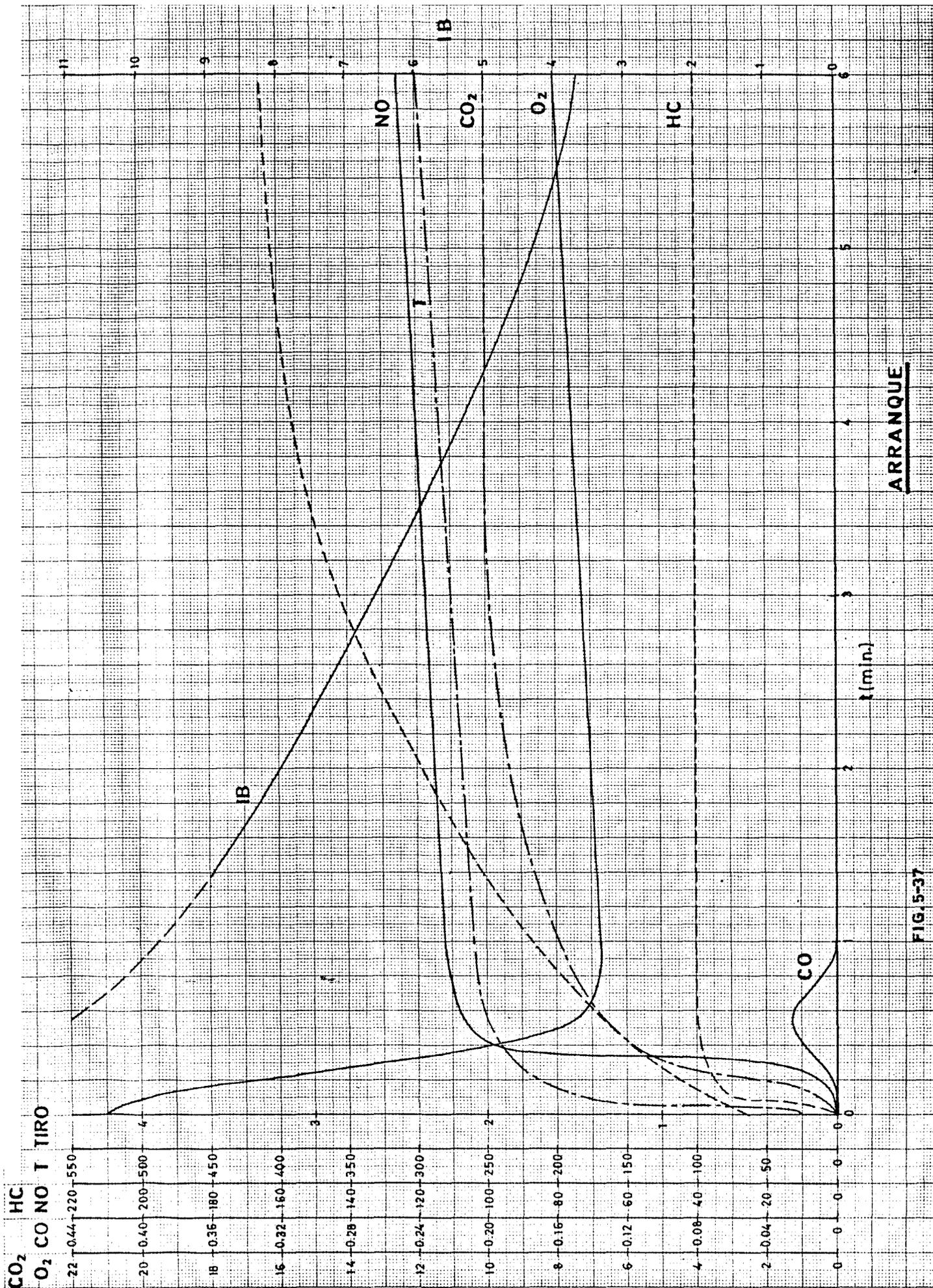
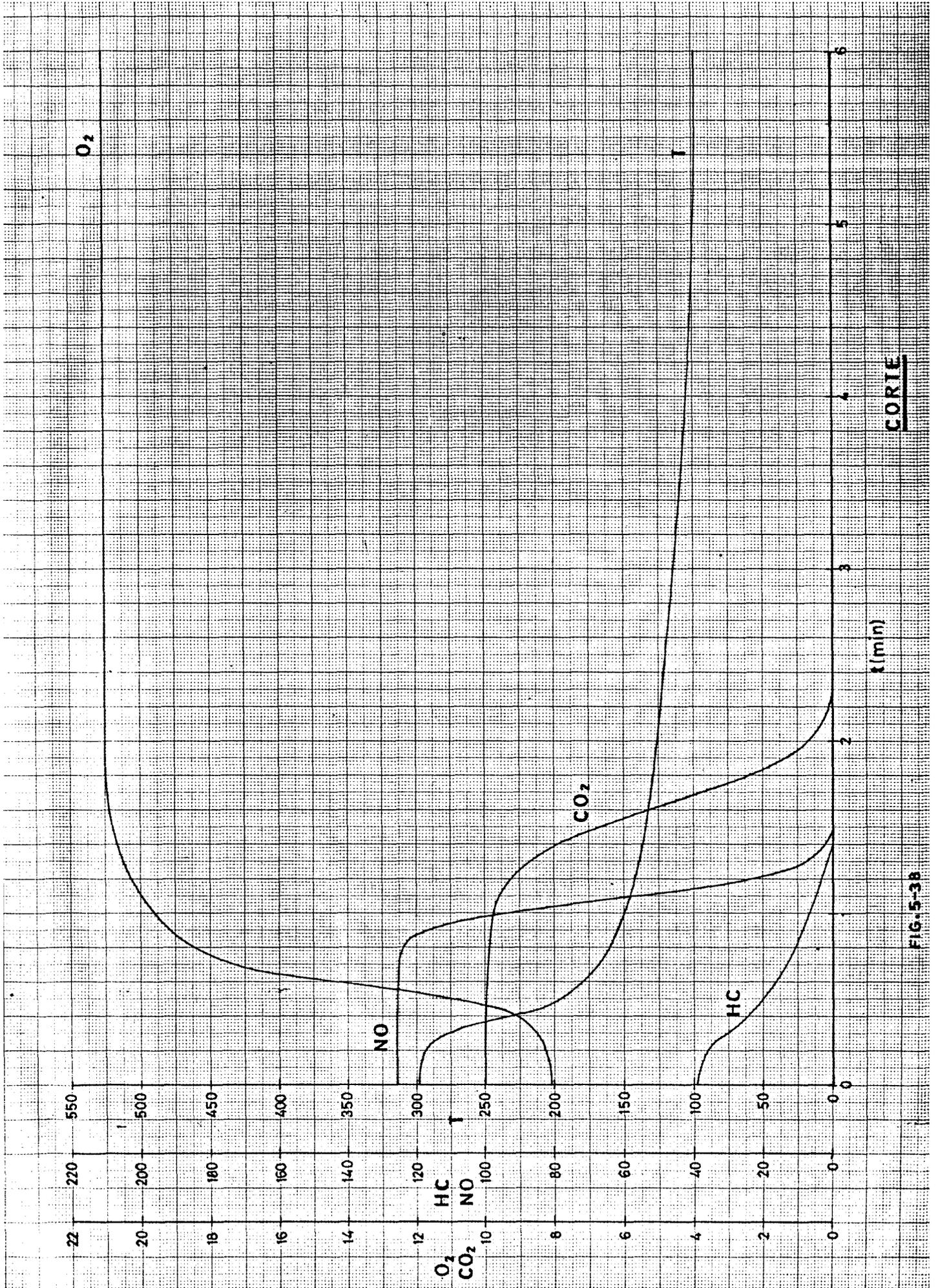


FIG. 5-37



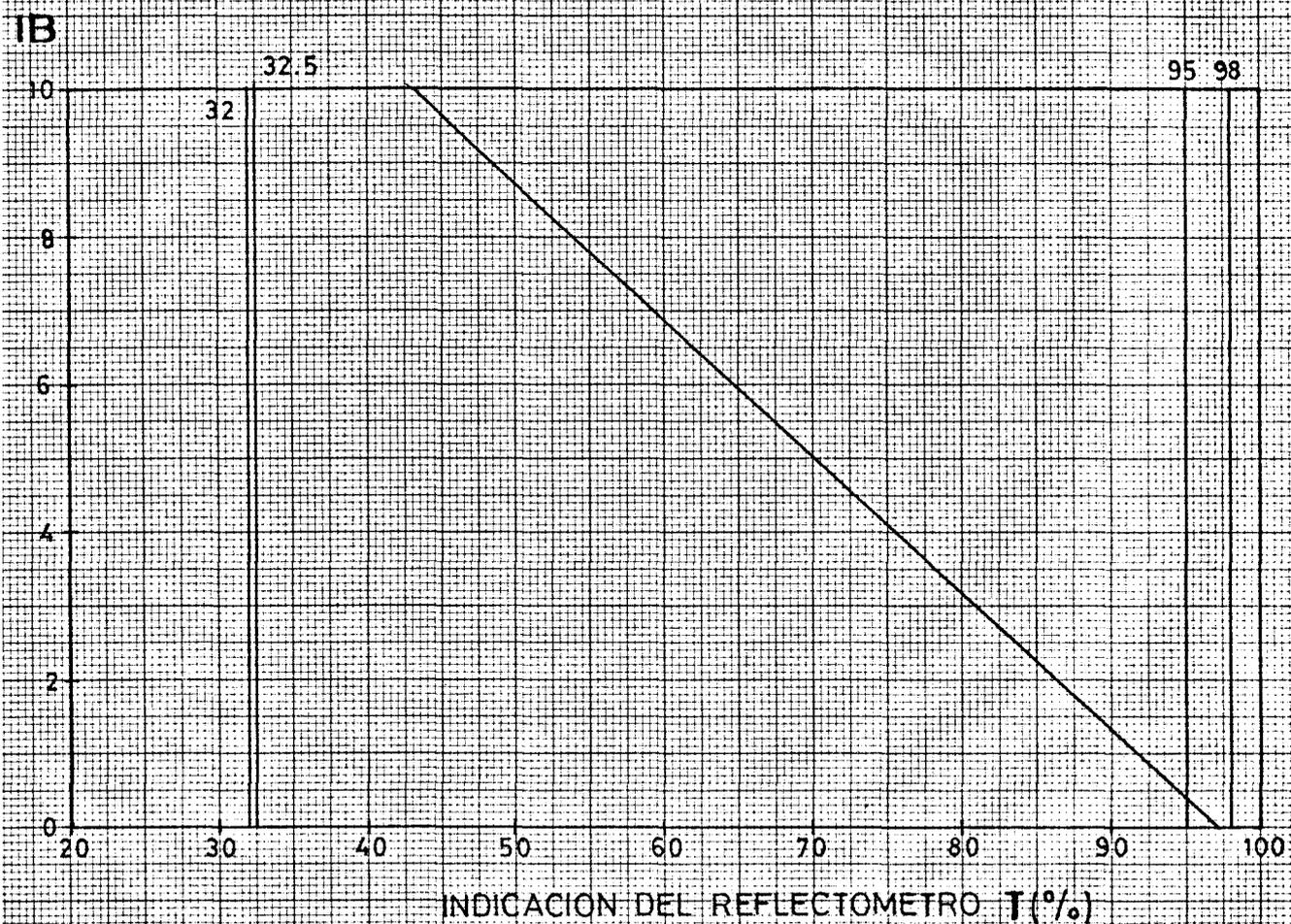
CORIE

FIG. 5-38

de IB y la indicación del reflectómetro. Con este método se pueden detectar muy bien valores fraccionarios de IB y extrapolar a valores de IB superiores a nueve. En la Fig.5.39 se presenta la correlación obtenida.

Las evoluciones de CO_2 y O_2 son inicialmente más rápidas, pero lógicamente no alcanzan la estabilización total hasta que no la han alcanzado el tiro y la opacidad de humos. En cuanto a los inquemados gaseosos NO , CO y HC la respuesta es rapidísima alcanzándose los valores de emisión prácticamente estables en tiempos inferiores al medio minuto, lo que significa que el efecto de la frecuencia de arranques en la emisión de estos contaminantes es prácticamente despreciable y el único efecto perjudicial queda reducido a la emisión de hollines.

La Fig.5.37, que presenta la evolución en la parada, evidencia que los tiempos de estabilización son cortos y que las emisiones de contaminantes caen rápidamente a cero, lo que significa que no aparecen efectos adicionales de contaminación durante las paradas.



CORRELACION DE IB E INDICACION DEL REFLECTOMETRO

5.9 Referencias

- 5-1 Anuario Español del Petróleo, 1973, ANESPE.
- 5-2 SALVI, G. : "La Combustione - Teoría e applicazioni" Tamborini Ed. Milano, 1968.
- 5-3 STERN, A.C. : "Air Pollution" Academic Press, New York.
- 5-4 SURUQUE, J. : "Experimental Methods in Combustion Research" Agard - Pergamon Press.
- 5-5 DETRLE : "La pollution atmospherique" Ed. Dunod.
- 5-6 BENITO GIL, F. : "Fuel-oil, almacenamiento, combustión y contaminación atmosférica"
- 5-7 MAUSS-RIVIENE-SEVOZ : "Etude de la formation de résidus de combustion solides dans les chaufferies de groupes d'inmeubles" Institut. Francais de Pétrole Vol. XVI, 1961.
- 5-8 SYROTA, J. : "La lutte contre la pollution admosphérique des instalations de combustion" Pollution Atmosphérique. Jul. 1972.
- 5-9 BOUSCAREN - DETRIE : "Calcul de la hauteur des cheminées" Jan-Mars. 1972.
- 5-10 STARKMAN : "Theory, experiment, and rationale in the generation of pollutants by combustion" 12 Symposium (Int) on Combustion, 1971.
- 5-11 CARETTO : "Modeling pollutant formation in combustion processes" 14 Symposium (Int) on Combustion, 1973.

- 5-12 BLAKESLEE-BURBACH : "Controlling NO_x Emissions from Steam Generators"
Journal Of APCA, Jan 1973.
- 5-13 MAC-KINNON - : "Minimizing NO_x Pollutants from Steam
INGRAHAM Boilers"
Journal of APCA, Jun 1972.
- 5-14 HARDISON : "Techniques for controlling the oxides
of nitrogen"
Journal of APCA, Jun 1970.
- 5-15 BAGWELL - ROSENTHAL : "Utility Boiler Operating Modes for
TEIXEIRA - BREEN - Reduced Nitric Oxide Emissions"
BAYARD DE VOLO - KERHO
- 5-16 TOMANY - KOPPANS - : "Survey of Nitrogen-Oxides Control
BURGE. Technology and the Development of a
Low Emissions Combustor"
Journal of Engineering for Power,
July 1971.
- 5-17 SWITHENBANK, POLL, : "Combustion design fundamentals"
VICENT, WRIGHT 14 Symposium (Int) on Combustion,
1973.
- 5-18 MAGNUSSEN, B. : "Prediction of characteristics of
enclosed turbulent jet flames"
14 Symposium (Int) on Combustion,
1973.
- 5-19 ENGLEMAN y otros : "Experimental and theoretical studies
of NO_x formation in a jet-stirred
combustor"
14 Symposium (Int) on Combustion, 1973.
- 5-20 Coloquio sobre contaminación atmosférica producida por la
combustión de los derivados del petróleo. INTA 1963.
- 5-21 Developments in sampling and analysis instrumentation for
stationary sources. NAPER. Journal of the APCA. Julio 1973.

- - - - -

CAPITULO 6°

A N E X O

DETECCION REMOTA DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

6. ANEXO. DETECCION REMOTA DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

6.1 Introducción

El tema de la detección remota de contaminantes es de reciente aparición y presenta un gran interés, teniendo una gran aplicación para la medición de óxidos de nitrógeno, por lo que se ha considerado de positivo interés incluir una revisión del tema.

La mayoría de los métodos de medida de contaminación del aire que se usan en la actualidad son de tipo directo, es decir, exigen contacto entre un instrumento y una muestra de aire a analizar. Los métodos indirectos o remotos, basados, generalmente, en procesos de interacción entre radiación electromagnética y contaminantes, ofrecen, sin embargo, interesantes posibilidades para el futuro inmediato.

En efecto, hasta hace poco era posible considerar los enclaves humanos como sistemas termodinámicos abiertos, en contacto con un sistema de dimensiones infinitas (la Tierra); a escala planetaria dichos enclaves aparecían como fuentes puntuales (de calor, de contaminantes, etc.) en un medio ilimitado, sin modificación del estado general del planeta. Como la información de interés concernía tan sólo el entorno de dichas fuentes, podía ser obtenida por medio de mediciones locales.

Al haber incrementado muy grandemente la contaminación atmosférica en los últimos años, los problemas que origina comienzan a mostrar tendencias de carácter global, especialmente en cuanto a sus efectos sobre el clima, al mismo tiempo niveles con frecuencia peligrosos en muchas aglomeraciones urbanas. Como consecuencia, tiene un gran interés acudir a una vigilancia global de los contaminantes atmosféricos, que proporcione información sobre la localización y velocidades de producción de las fuentes de contaminación; sobre los sumideros, las vías de dispersión, las concentraciones, etc. Tal información permitiría establecer modelos matemáticos para describir la evolución del estado de cocontaminación, y adoptar medidas para controlar tal estado.

Afortunadamente, como en el problema similar de la predicción meteorológica a largo plazo, el desarrollo reciente de los satélites artificiales parece ofrecer una solución al problema de dicha vigilancia⁶⁻¹. Los satélites permiten realizar mediciones periódicas frecuentes en las regiones más lejanas del planeta, proporcionando información de carácter global, con la ventaja fundamental de que la multitud de medidas efectuadas desde un satélite requiere una calibración única. Debido, sin embargo, a que las capas atmosféricas de interés (troposfera y estratosfera) son inaccesibles a los satélites, no se pueden utilizar métodos directos y hay que acudir a procedimientos de

detección remota.

Los problemas para los que la vigilancia global de la contaminación es de interés son múltiples: La resolución de la paradoja de Jaffe⁶⁻² sobre el posible crecimiento de la concentración de CO; el posible calentamiento de la tierra debido a la acumulación de CO₂, o su más probable enfriamiento a causa de la creciente concentración de partículas⁶⁻³; el efecto de hidrocarburos, SO₂ y NO_x sobre la formación de ozono y de aerosoles en la atmósfera; etc.

Por otra parte, la detección remota de contaminantes presenta atractivos por si misma: perturba mínimamente el medio, permite estudiar zonas de difícil acceso, y tiene tiempos de medida prácticamente nulos, contrariamente al caso usual de los métodos directos. A causa de esto, parece también interesante utilizar sensores remotos a bordo de aviones para vigilar el estado de la atmósfera sobre zonas extensas (por ejemplo, la península Ibérica entera) e incluso sobre grandes núcleos urbanos.

Evidencia de las posibilidades de los métodos remotos existe ya. Desde satélites se han medido parámetros atmosféricos tales como la temperatura, el contenido de vapor de agua en la troposfera, y la concentración de ozono en la estratosfera^{6-4,6-8}. La detección de ciertos contaminantes (SO₂, NO₂,

NO₃H) ha sido ya realizada, aunque no desde satélites, sino desde globos sonda o aviones.

La detección remota desde aeronaves permite, evidentemente, obtener datos tan localizados en el espacio y en el tiempo como se necesitan en estudios de tipo regional. Debido a limitaciones instrumentales, parece difícil, sin embargo, obtener por medio de satélites la resolución espacial deseada para estudios de carácter global. En la troposfera, por ejemplo, parece posible determinar el contenido total de contaminantes sobre la unidad de área en la superficie terrestre, pero no su distribución en altura. Tales limitaciones son, no obstante, remediables en parte utilizando información complementaria (datos meteorológicos sobre vientos, medidas de concentraciones en la superficie, conclusiones de análisis teóricos, etc.). Por otra parte, en la estratosfera sí es posible la medida de la distribución en altura de los contaminantes.

En el estudio presente se discuten las características espectrales tanto de la atmósfera limpia como de los contaminantes, y los métodos de detección remota de uso posible. Dentro del tema específico de este Programa de Investigación de la Fundación Juan March, que se ha centrado en los óxidos de nitrógeno, los estudios sobre el tema de la contaminación global se referirán a los problemas ya mencionados de fenómenos

físico-químicos de evolución de los óxidos de nitrógeno en la at
mósfera.

6.2 Características espectrales de la atmósfera limpia, y de los contaminantes atmosféricos

Los métodos de detección remota se pueden clasificar en pasivos y activos. Los primeros utilizan radiación electromagnética de origen natural (fundamentalmente, radiación de origen solar o terrestre). Los métodos activos, de tipo radar o laser exigen una fuente de potencia artificial. Debido principalmente a las limitaciones de peso y potencia usuales, no parece posible el uso de métodos activos a bordo de satélites, en el futuro inmediato, aunque, por ejemplo, sí se han utilizado tales métodos para medidas desde tierra o desde aeronave^{6-9.6-11}.

Las regiones espectrales en las que las radiaciones solar y terrestre son apreciables están bastante bien diferenciadas. La radiación solar comienza en el ultravioleta y termina en el infrarrojo (alrededor de $\lambda \approx 4\mu\text{m}$, siendo λ la longitud de onda). La radiación terrestre comienza hacia $\lambda \approx 2\mu\text{m}$ y alcanza a la region de microondas. Hay, por tanto, un intervalo de solape de anchura $\Delta\lambda \approx 2\mu\text{m}$, que depende ligeramente de variables tales como la altura del sol y la temperatura del suelo. En general, la radiación terrestre domina por encima de $\lambda \approx 3\mu\text{m}$.

Por debajo de $\lambda \approx 0.3\mu\text{m}$, oxígeno molecular y ozono absorben prácticamente toda la radiación solar, por encima de la troposfera. Por esta razón, mediciones de tipo regional en esta zona espectral, por métodos activos utilizando aviones, se realizarían en óptimas condiciones en lo que respecta al cociente señal/ruído. En el resto del ultravioleta, y en toda la región visible, la atmósfera es prácticamente transparente (transmisión próxima a la unidad). En el infrarrojo y hasta $\lambda \approx 25\mu\text{m}$, se alternan intervalos espectrales transparentes y opacos, donde la absorción es debida principalmente a vapor de agua, ozono y dióxido de carbono. Por encima de $\lambda \approx 25\mu\text{m}$, y en casi todo el extremo infrarrojo, las bandas de absorción rotacionales del vapor de agua son tan intensas y frecuentes que hacen totalmente opaca la atmósfera. En la región de microondas, la transmisión es de nuevo próxima a la unidad.

La interacción de los gases de la atmósfera con la radiación electromagnética no se reduce a procesos de emisión y absorción. Las moléculas gaseosas dispersan también radiación incidente en ellas. Como las moléculas tienen dimensiones del orden de $10^{-4}\mu\text{m}$ y los valores de λ de interés exceden $0,3\mu\text{m}$, esta dispersión tiene lugar según la ley de Rayleigh para partículas pequeñas comparadas con la longitud de onda de radiación. La sección eficaz de dispersión es proporcional a λ^{-4} . Como consecuencia, la dispersión de Rayleigh es solamente apreciable en las regiones ultravioleta y visible.

La presencia de nubes en la atmósfera afecta substancialmente la transmisión de ésta. Las gotas de agua absorben y dispersan fuertemente la radiación, por lo que se hace muy difícil la interpretación de los resultados experimentales. Tan sólo en la región de microondas existen intervalos espectrales ("ventanas") para los que las nubes son prácticamente transparentes. Como se puede afirmar de un modo estadístico que la mitad de la superficie terrestre se encuentra cubierta de nubes en cualquier momento, es evidentemente necesario disponer de una observación independiente (realizable a bordo del propio satélite) que proporcione información sobre el estado de cobertura de las nubes. Debe observarse, sin embargo, que la mayoría de éstas se encuentran en la troposfera, por lo que las mediciones en la estratosfera no presentan dificultades a este respecto.

La presencia de gases contaminantes en la atmósfera puede ser detectada, en principio, por producirse una reducción apreciable en la transmisión de radiación, en intervalos específicos de longitud de onda correspondientes a las bandas de absorción de dichos gases.

En las regiones ultravioleta y visible, los únicos contaminantes con fuertes coeficientes de absorción son SO_2 , NO_2 y O_3 , de los cuales sólo NO_2 absorbe en la región visible (es

el gas que causa el color castaño del smog de las ciudades con mucha luz y muchos automóviles). Las secciones eficaces de absorción de estos contaminantes en el ultravioleta están tabuladas⁶⁻¹².

En el infrarrojo, prácticamente todos los contaminantes presentan bandas de absorción significativas. Los coeficientes de absorción y las posiciones de las bandas de los contaminantes más importantes están también tabulados, aunque con resolución escasa⁶⁻¹³.

Existe una polémica en la actualidad sobre la utilidad de la región de microondas para detección remota de tipo pasivo. Se ha afirmado⁶⁻¹³ que en la troposfera la presión es tan alta que las líneas espectrales se solapan, por lo que resulta imposible discriminar entre los distintos gases contaminantes. Estudios llevados a cabo en el Langley Research Center indican, sin embargo, que los datos sobre anchura de líneas citados en la ref.⁶⁻¹³ yerran en exceso por un orden de magnitud. Es evidente, por otra parte, que debido a la más baja presión de la estratosfera, mediciones en esta capa no presentarían dificultades a este respecto. Parece, no obstante, que la resolución espacial alcanzable por medidas en la región de microondas sería escasa⁶⁻¹⁴.

La presencia de partículas en la atmósfera afecta subs-

tancialmente la transferencia de radiación. Como el tamaño de las partículas (entre 0,1 y 10 μ m típicamente⁶⁻¹⁵) es del mismo orden de las longitudes de onda de interés, la dispersión de radiación no sigue la ley de Rayleigh; para partículas esféricas y homogéneas la dispersión sigue la ley de Mie. Parece que dicha dispersión es sólo apreciable en las regiones visible e infrarroja. Por otra parte, las partículas también absorben (y en el infrarrojo emiten) radiación.

El problema fundamental es el escaso conocimiento existente sobre la composición, forma y propiedades ópticas de las partículas. Parece que en la estratosfera las partículas se componen principalmente de sulfatos⁶⁻¹⁶. Aún cuando las características de las partículas fuesen conocidas, la interpretación de las medidas exige resolver el difícil problema de la transferencia de radiación en una atmósfera turbia, limitada e inhomogénea.

Existe, sin embargo, una característica de la dispersión de Mie que ofrece grandes posibilidades para detección remota; mientras que la radiación dispersada por moléculas es altamente polarizada (y la radiación solar no lo es), la dispersión por partículas es predominantemente no polarizante. Como la densidad de los gases atmosféricos varía relativamente despacio con el tiempo y el espacio, mientras que la densidad de

partículas varía bruscamente; y como la dispersión de Rayleigh decrece rápidamente con la longitud de onda, mientras que la de Mie varía lentamente, existen grandes posibilidades para detectar la presencia de partículas. La obtención de información cuantitativa detallada parece más difícil debido a efectos tales como el relativo grado de polarización de la radiación solar reflejada por el suelo, o la importancia de dispersión de Rayleigh múltiple.

6.3 Técnicas de medición

Los instrumentos de medida a bordo de los satélites deben estar orientados hacia la superficie terrestre. Existen dos orientaciones extremas, y, por tanto, con más fácil análisis e interpretación de resultados, que dan lugar a dos técnicas de medición bien diferenciadas: técnicas verticales y técnicas de exploración del horizonte.

Las técnicas de exploración del horizonte tienen dos importantes ventajas. La línea de observación del instrumento se hace pasar a diversas alturas sobre el horizonte, dentro de las capas atmosféricas de interés, por lo que se puede determinar cómo varía con la altitud la concentración del contaminante considerado; para las altitudes de interés es evidente que sólo una estrecha capa de aire (de unos pocos kilómetros de es

pesor) interaccionará con la radiación observada por el instrumento, por lo que se puede conseguir una buena resolución en altura. Por otra parte, la radiación llega al instrumento tras recorrer un trayecto horizontal que contiene una cantidad de contaminante extremadamente mayor que la que se encontraría con una observación vertical de la región de interés, por lo que la sensibilidad de la medida es muy alta. La desventaja debida a que la concentración del contaminante estudiado es promediada sobre distancias horizontales de varios cientos de kilómetros, carece realmente de importancia pues las variaciónes horizontales en la estratosfera y alta troposfera presentan escalas de variación mayores. A causa del largo trayecto horizontal recorrido por la radiación observada, y a la alta cobertura de nubes de la superficie terrestre, las técnicas de exploración del horizonte son sólo útiles realmente para estas capas atmosféricas.

Las técnicas de exploración horizontal son de dos tipos: de ocultación y de emisión. La primera consiste en medir la atenuación de la radiación de un cuerpo celeste al pasar por la atmósfera; la fuente de radiación es, generalmente, el Sol, aunque puede serlo la Luna o, incluso, una estrella. Para obtener buena resolución vertical, es preciso tener en cuenta el efecto de la refracción. Esta técnica ha sido usada a bordo tanto de globos sonda como de satélites para medir constituyen

tes atmosféricos como el ozono o el oxígeno molecular^{6-17,6-19}. Se ha programado el uso de este método, a bordo del satélite OSO-J, para medir el contenido de aerosoles en la estratosfera.

El segundo tipo de técnica de exploración horizontal consiste en medir o la emisión térmica de la atmósfera en el infrarrojo o la radiación solar dispersada por la atmósfera en el ultravioleta^{6-20,6-21}. Una ventaja importante de esta técnica, si se la compara con las técnicas de medición verticales, es que la señal se observa sobre el fondo, no emisor, del espacio interplanetario, sin la interferencia de la radiación emitida o reflejada por la superficie terrestre.

En las técnicas verticales, se observa una estrecha franja de la superficie de la Tierra en torno a la proyección vertical del satélite sobre dicha superficie. Existen dos tipos de medidas. En uno se observa la radiación térmica originada en la superficie o en la atmósfera; la posibilidad de determinar la presencia de contaminantes se debe a que la temperatura de la superficie terrestre difiere de la atmosférica, que depende de la altitud, y a que la emisividad de dicha superficie difiere de la unidad. El primer efecto está altamente influenciado por las condiciones meteorológicas. El segundo es más apreciable en la región de microondas que en el infrarrojo.

En el segundo tipo de medida se estudia la atenuación

de la radiación solar reflejada por la superficie en su paso hacia el satélite. Desgraciadamente, una parte substancias de la radiación solar observada por el instrumento de medida proviene de la dispersión, simple o múltiple, de la radiación por los gases de la atmósfera. Este efecto es muy pronunciado en el ultravioleta.

Es posible discriminar entre la radiación reflejada y la dispersada, debido a que el albedo de la superficie presenta importantes fluctuaciones. Por otra parte, el proceso de la dispersión varía con la longitud de onda mucho más lentamente que los procesos de absorción. La posibilidad de identificar contaminantes desde globos sonda ha sido demostrada⁶⁻²².

Las técnicas de medición verticales no parecen poder proveer la distribución en altura de los contaminantes, aún cuando alguna información a este respecto puede ser inferida si se tienen medidas simultáneas de radiación terrestre y solar. Para obtener buena resolución en altura será preciso apelar a métodos de tipo activo de los cuales el laser radar (lidar) parece el más prometedor. Sería preciso pulsar el laser para discriminar la radiación natural; el laser apuntaría hacia la superficie terrestre y se mediría la radiación dispersada hacia atrás por la presencia de contaminantes. La identificación de ésta no es posible si la dispersión es sólo de tipo

Rayleigh o Mie. Existen, sin embargo, otros procesos de dispersión (dispersión resonante y dispersión de Raman) que parecen permitir tal identificación. La dispersión de Raman, en particular, puede ser la de más utilidad⁶⁻²³.

6.4 Referencias

- 6-1 "Remote Measurement of Pollution", NASA Special Publication 285, Washington D.C., 1971.
- 6-2 L.S. Jaffe, J. Air Poll. Contr. Assoc. 18, 534, 1968.
- 6-3 I. Rasool, en "Significant Accomplishments in Sciences", NASA Special Publication 286, p.37, Washington D.C.1972.
- 6-4 B.J. Conrat, R.A. Hanel, V.G. Kunde y C. Prabhakara, J. Geophys. Res. 75, 5831, 1970.
- 6-5 P.J. Ellis, G. Peckham, S.D. Smith, J.T. Houghton, C.G. Morgan, C.D. Rodgers y E.J. Williamson, Nature 228, 139, 1970.
- 6-6 D.Q. Wark, Appl. Opt. 8, 1761, 1970.
- 6-7 J.W. Dave y C.L. Mateer, J. Atmos. Sci. 24, 414, 1967.
- 6-8 G.P. Anderson, C.A. Barth, F. Cozla y J. London, Ann. Geophys. 25, 341, 1969.
- 6-9 G. Grams y G. Fiocco, J. Geophys. Res.72, 3523, 1967.
- 6-10 J.A. Cooney, Appl. Phys. Lett. 12, 40, 1968.

.

- 6-11 M.R. Bowman, A.J. Gibson y M.C.W. Sandford, Nature 221, 456, 1969.
- 6-12 J.O. Sullivan y A.C. Holland, NASA Contract Report-371, Washington D.C., 1966.
- 6-13 C.B. Ludwig, R. Bartle y M. Griggs, NASA Contract Report-1380, Washington D.C., 1969.
- 6-14 J.C. Alishouse, D.R. Baker, E.P. McClain y H.W. Yates, NOAA Tech. Mem. NESS 26, U.S. Dept. Com., 1971.
- 6-15 C.E. Junge, Air Chemistry and Radioactivity, Academic Press, New York, 1963.
- 6-16 C.E. Junge, C.W. Chagnon y J.E. Manson, J. Meteorol. 18, 81, 1961.
- 6-17 D. Murcray, T. Kyle, F. Murcray y W. Williams, J. Opt. Soc. Amer. 59, 1131, 1969.
- 6-18 J.A. Duardo, NASA Contract Report-86127, Washington D.C., 1968.
- 6-19 P.B. Hays y R.G. Roble, trabajo presentado en American Meteorological Society Annual Meeting, New Orleans, Enero 1972.
- 6-20 J.C. Gille y F.B. House, J. Atmos. Sci. 29, 1971.
- 6-21 J.M. Russell III y S.R. Drayson, J. Atmos. Sci. 30, 1972.
- 6-22 A.R. Barringer, Technical Rep. 70-148, Barringer Res. Ltd. 1970.
- 6-23 P.L. Hanst. Appl. Spect. 24, 161, 1970.

CAPITULO 7°

CONCLUSIONES (RESUMEN)

7. CONCLUSIONES (RESUMEN)

Se han obtenido a lo largo de este trabajo numerosos resultados y conclusiones que se han ido exponiendo en los sucesivos capítulos de esta Memoria. En este resumen final se destacan los resultados y conclusiones que se han estimado de mayor interés.

1) Se ha resuelto analíticamente el proceso cinético-químico de formación del óxido de nitrógeno en llamas hidrógeno aire, mediante un modelo del proceso que comprende 34 reacciones elementales.

2) Se han obtenido expresiones analíticas de la velocidad de reacción global del NO a 1000°C y a 3000°C, para presiones de hasta 40 Kg/cm².

3) Se han obtenido expresiones analíticas de temperaturas de llamas laminares premezcladas y de difusión en un modelo con simetría esférica, utilizando un gas neutro como diluyente. Se ha demostrado que puede conseguirse una importante reducción en la temperatura máxima del proceso mediante la disposición de una llama premezclada en primer lugar seguida de una llama de difusión.

4) Se han obtenido expresiones analíticas de la formación de NO en llamas laminares de difusión.

5) Se han obtenido expresiones analíticas de la formación de NO en combustión de gotas y masas esféricas de gas en una

atmósfera oxidante y en régimen laminar, demostrándose que la producción de NO es inversamente proporcional al cuadrado del radio de la gota.

6) Se ha obtenido información experimental sobre la reducción de NO en cámaras de combustión continua al disminuir la temperatura de combustión y el tiempo de residencia en la cámara de las partículas de gas.

7) Se ha comprobado experimentalmente que la combustión de un combustible líquido en forma de gotas en régimen turbulento no aumenta la producción de NO al compararla con la combustión del mismo combustible vaporizado.

La fuerte difusión turbulenta y la imposibilidad de existencia de frentes individuales de llamas alrededor de las gotas a causa de la convección forzada, explican estos resultados, no pudiendo aplicarse en estos casos los resultados de la teoría laminar.

8) Combustibles líquidos y gaseosos, ligeros o pesados (butano-propano, iso-octano, gasolina, queroseno) producen cantidades análogas de óxidos de nitrógeno en iguales condiciones de combustión.

9) En condiciones de fuerte formación de óxidos de nitrógeno, es decir, con riquezas altas de combustible y bajos gastos de aire, casi todos estos óxidos de nitrógeno aparecen en forma de NO. Por el contrario, con bajas riquezas de combustible y grandes gastos de aire, la proporción total de

óxidos de nitrógeno (NO_x) puede llegar a ser considerablemente mayor que la de NO .

10) Se ha desarrollado un modelo unidimensional de plantas generadoras de calor, funcionando con combustibles líquidos, que se verificó experimentalmente. Sobre este modelo puede analizarse el comportamiento de estas plantas en condiciones transitorias (arranque y parada).

11) Utilizando el modelo unidimensional se ha podido estudiar un método de regulación racional de esta clase de plantas, teniendo en cuenta condiciones de baja contaminación y elevado rendimiento global.

12) Se ha llevado a cabo una exploración completa mediante sondeo de la zona de combustión de una planta generadora de calor, midiéndose temperaturas y concentraciones de CO_2 , O_2 , CO , SO_2 y NO_x , con lo que pudo definirse la estructura de la llama. Esta labor experimental ha conducido al desarrollo de técnicas originales de medición.

13) Se ha podido obtener una relación directa entre las concentraciones de los óxidos de nitrógeno en salida de chimenea y las temperaturas en la zona de reacción.

14) Se ha obtenido información experimental sobre la influencia de la forma de los perfiles de las llamas en la formación de óxidos de nitrógeno, y sobre la rápida congelación de las reacciones de formación del NO una vez que los gases quedan fuera de la zona de combustión.

15) Finalmente, se señala que atendiendo a indicaciones de la Fundación Juan March, se ha dedicado una atención especial al tema de la bibliografía y referencias. Para el desarrollo de este programa de investigación se han consultado algo más de 230 trabajos, que han quedado reseñados en la bibliografía de cada capítulo.

- - - - -