

1126  
141  
2 es.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**FORMACION Y REDUCCION SELECTIVA  
NO CATALITICA DE OXIDOS DE  
NITROGENO, EN UN QUEMADOR  
DE PREMEZCLA.**

**T E S I S   P R O F E S I O N A L  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
E D G A R   R O B L E S   S A L C E D O  
V I C T O R   M A N U E L  
R O D R I G U E Z   H E R N A N D E Z**

**DIRECTOR DE TESIS:  
M.I. J. ESTEBAN BARRIOS BONILLA**

264081



**MEXICO, D.F. 1998**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ***AGRADECIMIENTOS***

Al departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental, por las facilidades y ayuda prestada, para la realización de este proyecto.

A los compañeros del Laboratorio, que nos apoyaron en todo momento, para la realización del proyecto.

Al recinto donde nos formamos como profesionistas, además de hombres. Al espacio que nos brindó la "***UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA de MEXICO***".

A todas las personas que de alguna manera participaron en la elaboración del proyecto.

Al M.I. J. Esteban Barrios Bonilla, por permitimos trabajar junto con él, en un proyecto ambicioso y por toda la ayuda que nos brindó.

Gracias a todos ellos.

# INDICE GENERAL

<i>Tema</i>	<i>Página</i>
<b>Resumen</b>	I
<b>Objetivos</b>	III
<b>Capítulo 1</b>	
Introducción	1
Problemas de contaminación provocados por los óxidos de nitrógeno (NOx)	2
Emisiones de NOx, producidas en México	3
Normas para la salud	4
<b>Capítulo 2</b>	
Control tecnológico de NOx después de la combustión	6
Conceptos fundamentales	7
Reducción selectiva catalítica (SCR)	8
Reducción no - selectiva catalítica (NSCR)	9
Reducción selectiva no - catalítica (SNCR)	10
Cantidad de NOx removible	12
Escurremientos de amoniaco	13
Limitaciones del SNCR	13
<b>Capítulo 3</b>	
Desarrollo experimental	15
Construcción del sistema para la combustión; homo y chimenea	15
Descripción del quemador utilizado	17
Descripción de la instalación: Homo y chimenea	18
Instalación del suministro de combustible (Gas L.P.)	19
Diseño del sistema experimental	19
Diseño, selección y control del equipo de inyección	20
Boquilla de inyección de acero inoxidable	21
Protocolo de experimentación	21
Protocolo para el sistema de combustible (Gas L.P.)	21
Protocolo del sistema de inyección (SNCR)	22
Protocolo del Bacharach 300 NSx	22

## **Capítulo 4**

Análisis de resultados	24
Parámetros y variables a considerar	24
Exceso de aire	24
Diagrama de Ostwald	26
Mapeo de temperaturas en el sistema de combustión	30
Características ambientales	30
Variables auxiliares en la medición	32
Reducción de óxidos de nitrógeno	35
Importancia de la temperatura de inyección	43

<b>Conclusiones</b>	44
---------------------	----

- <b>Referencias Bibliograficas</b>	46
-------------------------------------	----

<b>Apéndice A. Normas Oficiales Mexicanas para fuentes fijas y fuentes móviles</b>	50
--	----

<b>Apéndice B. Listado del programa de cálculo</b>	54
--	----

<b>Apéndice C. Reacciones y aire estequiométrico necesario para combustibles gaseosos</b>	55
---	----

<b>Apéndice D. Obtención de los parámetros para el diagrama de Ostwald</b>	60
--	----

---

# *Resumen*

---

Los óxidos de nitrógeno, son uno de los elementos que favorecen la formación de ozono, trayendo consigo grandes consecuencias. Por tal motivo, es necesario reducirlos con la intención de tener un menor número de contaminantes que afecten la salud. Para lograrlo, existen hoy en día un gran número de tecnologías que reducen estas emisiones, ya sea antes de la combustión, en la combustión misma o bien, después de la combustión. Pero se eligió el método de Reducción Selectiva no - Catalítica usando amoníaco como agente reductor ya que es el que más se adecua a las necesidades del proyecto a causa de que el amoníaco es fácil de conseguir, su almacenamiento no requiere de un depósito muy grande y se determinó que solo es necesario inyectar de 1.5 a 2 en la relación  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  en ppm, además no requiere depósitos especiales para su manejo.

La reducción selectiva no catalítica, es un proceso químico que cambia los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), en nitrógeno molecular y vapor de agua utilizando como agente reductor amoníaco o urea, el cual se inyecta hacia los productos de la combustión en zonas de alta temperatura, entre 1,150 y 1,450 K. De tal manera, la reducción selectiva no catalítica podrá reducir, en teoría, de un 40 a 60 % las emisiones.

Para llevar a cabo la reducción primero fue necesario construir un modelo para la combustión, este consistió en: horno, chimenea y quemador de premezcla utilizando gas L.P. alcanzando temperaturas de 1,400 K y viéndose favorecidas las emisiones de  $\text{NO}_x$  en un máximo de 125 ppm. Una vez establecidas las condiciones de mayor emisión de los óxidos, se pasó a la siguiente etapa, reducción de emisiones, manteniendo las siguientes condiciones constantes en  $\phi = 1.14$  y 125 ppm de  $\text{NO}_x$  que se establecieron en una primera etapa.

Se hizo un mapeo de temperaturas a lo largo del horno y chimenea para localizar los puntos más apropiados de inyección; una vez establecida esta zona se instaló un sistema de inyección de amoníaco, el cual consiste en una bomba reciprocante de aire, depósito de amoníaco, tubería y válvulas de precisión para controlar el flujo de reactante, encontrando que los óxidos de nitrógeno disminuyen de 125 ppm a 85 ppm.

De la experiencia se concluyó que la formación de los óxidos de nitrógeno se deben primordialmente al NOx térmico en segundo término al NOx instantáneo y el NOx que se puede presentar por el nitrógeno del combustible no existe ya que se quemó gas LP el cual no lo contiene.

---

# *Objetivos*

---

***En la realización de este proyecto, se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:***

- Construcción de un sistema para la combustión, consistente en horno, quemador y chimenea, para quemar gas L.P. y producir cantidades apreciables de NO<sub>x</sub> para la experimentación.
- Producción de Oxidos de Nitrógeno, en flamas premezcladas usando gas L.P. como combustible.
- Determinación de las fracciones óptimas de dosificación del amoníaco (NH<sub>3</sub>) para la reducción de los Oxidos de Nitrógeno.
- Determinación de la temperatura óptima en los gases de combustión para la inyección de NH<sub>3</sub>
- Reducción de los Oxidos de Nitrógeno, por el método SNCR.

---

# Capítulo 1

---

## **INTRODUCCION**

El problema de la contaminación atmosférica a partir de hace aproximadamente veinte años se ha convertido en un tema de investigación importante, ya que a cada aumento de sustancias extrañas que arrojamos al medio ambiente, corresponde un empeoramiento de las condiciones generales de vida. Al aumentar la contaminación, se tendrán cada vez más enfermedades pulmonares.

La contaminación mediante los Oxidos de Nitrógeno (NOx) emitidos al medio ambiente presentan múltiples aspectos, todos ellos relacionados entre sí, de todos los existentes en la atmósfera, el óxido nítrico (NO) y el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) son los que más abundan y además son los que traen consigo más efectos. No se conoce el número ni la naturaleza de todas las fuentes productoras, pero la más importante es la combinación directa de oxígeno y nitrógeno en el aire a muy altas temperaturas.

Una fuente productora, creada por el ser humano, es la realización de algunos procesos químicos, así como el proceso de combustión en procesos industriales o en los automóviles.

Por otro lado la combustión se realiza con gas L.P. el cual es una mezcla constituida preferentemente por hidrocarburos C<sub>3</sub> - C<sub>4</sub> saturados y no saturados (generalmente los primeros términos de la serie parafínica u olefínica), en proporciones muy diversas; junto a los hidrocarburos pueden encontrarse otros gases combustibles, como hidrógeno, óxido de carbono, compuestos sulfurados y también gases inertes, como anhídrido carbónico, nitrógeno, helio, etc. En si la combustión de las mezclas gaseosas es evidentemente más sencilla que la de los combustibles líquidos y sólidos, puesto que la unión con el comburente, operación que determina la calidad de la combustión, es mucho más fácil de lograr

Para realizar la combustión se utilizó un quemador de premezcla el cual basa su principio de funcionamiento en quemar una mezcla de gas con aire - obtenida aprovechando la presión del gas - en un punto que precede a la zona donde se produce la llama. El gas sale por una tobera situada en la parte baja del tubo del quemador, en la proximidad de las aberturas creadas en el cuerpo de este último con el fin de permitir la entrada del aire (aire primario); por efecto del chorro de gas se crea en la zona una depresión, que favorece la aspiración del aire y la sucesiva mezcla de éste con el gas en el tubo superior. La mezcla que recorre el tubo debe tener una velocidad suficiente para impedir que la llama que se forma después de la ignición, en la extremidad libre penetre en el interior del quemador. En la combustión completa del gas participa también el aire que rodea la llama (aire secundario).

A continuación se presenta la forma de cómo se producen los óxidos de nitrógeno, sus consecuencias, así como una técnica de reducción. Además se planteará una solución a fin de reducir a la mínima cantidad posible las emisiones de NO<sub>x</sub>, que son emitidas al medio ambiente.

## **PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN PROVOCADOS POR LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)**

[ Caselli, 1] Las moléculas de nitrógeno y de oxígeno coexisten naturalmente en el aire, sin reaccionar entre sí a las temperaturas ambientales. No obstante, cuando el nitrógeno y el oxígeno se encuentran en mutua presencia y la temperatura alcanza entre 1,373 y 1,473 K, sus moléculas se combinan principalmente para formar óxido nítrico (NO) y eventualmente NO<sub>2</sub>:



La cantidad de óxido nítrico que se forma, aumenta conforme se incrementa la temperatura. El óxido nítrico se halla siempre en equilibrio potencial con el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>); sin embargo, cuando la temperatura es elevada, la fracción de (NO y NO<sub>2</sub>) que está presente en forma de bióxido de nitrógeno es más bien baja, alrededor de 0.5 %, debido a que la alta temperatura favorece la descomposición del bióxido de nitrógeno en óxido nítrico y oxígeno. Cuando los gases calientes de un automóvil o de una chimenea son emitidos a la atmósfera, su temperatura se abate y la tendencia sería hacia una transformación casi completa de NO<sub>x</sub> (NO y NO<sub>2</sub>). No obstante, la velocidad de esta reacción depende directamente del cuadrado de la concentración del óxido. Esto significa que si durante la emisión del tubo de escape de un auto los gases que se descargan vienen diluidos en un factor de 200, la velocidad de la reacción disminuye en 40,000 veces. Por otro lado, hay otros factores que entran en juego, como el incremento en la concentración del oxígeno; el resultado de todo ello es que entre el 10 y el 15% de los óxidos de nitrógeno permanecen en el aire, en forma de NO<sub>2</sub>.

En un aire contaminado, hay otros procesos que provocan la transformación de bióxido de nitrógeno; estos procesos consisten en reacciones con sustancias muy oxidantes (smog fotoquímico), como el ozono, o muy reactivas, como el HO<sub>2</sub>. Por lo que hemos dicho, resulta evidente que se formarán óxidos de nitrógeno en todos los procesos de combustión en los que la temperatura sea superior al millar de

grados; de hecho, en casi todos los procesos de combustión se utiliza aire, en el cual están presentes el oxígeno y el nitrógeno. Y en efecto, de los cerca de 50 millones de toneladas de NOx (NO y NO<sub>2</sub>) que se emiten anualmente en todo el mundo, más del 90% proviene de procesos de combustión que quedan repartidos a partes más o menos iguales entre las combustiones que se efectúan en instalaciones fijas, civiles e industriales y las que se realizan en el sistema de transportes.

En zonas donde se reúnen grandes cantidades de habitantes o de industrias, particularmente cuando las condiciones meteorológicas son desfavorables, la concentración de óxidos de nitrógeno en el aire se incrementa en forma dramática, con respecto a los valores normales de la atmósfera. De hecho, la concentración media diaria puede alcanzar entre 0.4 y 0.5 ppm, o sea, valores de 400 a 500 veces superiores a los que son característicos en el aire no contaminado.

El bióxido de nitrógeno se forma durante la combustión como producto de la oxidación del nitrógeno atmosférico o, en menor grado, a partir del nitrógeno orgánico contenido en los combustibles.

El óxido nítrico y el bióxido de nitrógeno tienen otras implicaciones desde el punto de vista de la calidad del aire. En primer lugar, son precursores del ozono, el cual representa uno de los problemas más serios de contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Por otra parte, pueden oxidarse en la atmósfera dando lugar a la formación de ácidos, y finalmente de nitratos que al igual que los sulfatos, son partículas que intervienen en la disminución de la visibilidad.

## **EMISIONES DE NOx <sup>1</sup>, PRODUCIDAS EN MEXICO**

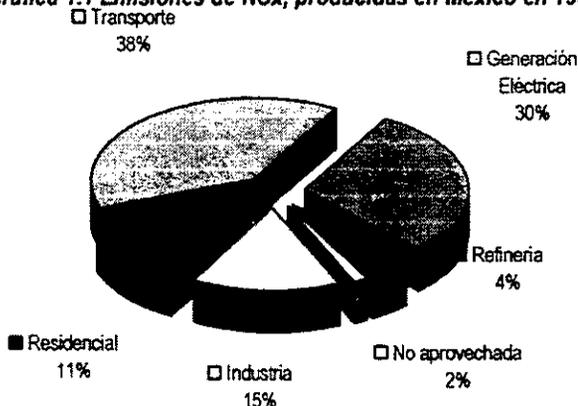
Tabla 1.1. Emisiones de NOx, producidas en México  
[Toneladas]

<b>Año</b>	<b>Generación eléctrica</b>	<b>Refinería</b>	<b>No aprovechada</b>	<b>Industria</b>	<b>Residencial</b>	<b>Transporte</b>	<b>Total</b>
1990	233,132	35,489	9,058	112,561	91,415	295,158	776,813
1991	235,522	34,896	8,835	113,086	92,575	316,276	801,190
1992	233,952	35,485	9,270	106,827	94,127	320,952	792,270
1993	245,860	34,856	11,987	114,562	95,154	328,013	830,432
1994	248,188	35,875	13,140	124,552	95,900	329,638	847,293
1995	248,825	33,360	13,652	124,282	95,624	327,202	842,945

Fuente: Organización Latinoamericana de Energía OLADE, "Estadísticas e indicadores económico energéticos de América Latina y el Caribe", Quito Ecuador, Junio de 1996

<sup>1</sup> Para facilidades de lectura, cuando se mencione Oxidos de Nitrógeno (NOx), nos estaremos refiriendo al Oxido nítrico (NO), así como el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

**Gráfica 1.1 Emisiones de NOx, producidas en México en 1995**



## **NORMAS PARA LA SALUD**

El gobierno federal ha establecido normas para la salud de contaminantes atmosféricos, especificando los niveles más allá de los cuales el aire es perjudicial para la salud. Las fases primera y segunda del plan de contingencia por la contaminación, están basadas en el grado de riesgo que estos niveles de contaminación implican para la salud.

Las normas se establecen para proporcionar un margen de salud adecuado de seguridad en la protección a la población. En el diseño de la Norma Oficial, para la Emisión de Contaminantes a la Atmósfera, los aspectos de la economía y tecnología no fueron tomados en cuenta como determinantes; ya que la decisión se basó en consideraciones de la salud de la población y se dijo que deben ser establecidas al máximo permisible (en exteriores) del nivel de aire que proteja la salud de cualquier grupo (sensible) de la población. También se señaló que las normas deben de proveer un grado razonable de protección a la salud contra aquellos riesgos que la investigación no ha definido completamente pero de los que se tiene evidencia suficiente para sospechar que existen.

A continuación se presentan los valores normados para los contaminantes de acuerdo con lo publicado en el Diario Oficial de la Federación, el 3 de diciembre de 1994.

Tabla 1.2 Valores normados para los contaminantes

<b>Contaminantes</b>	<b>Valores límites</b>		
	<b>Exposición aguda</b>		<b>Exposición crónica</b>
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Para la protección de la salud de la población susceptible
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.11 ppm (1 hora)	1 vez cada 3 años	---
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24 horas)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)
Bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm (1 hora)	1 vez al año	---
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm ((horas)	1 vez al año	---
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)
Partículas fracción respirable (PM10)	150 µg/m <sup>3</sup> (24 horas)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)
Plomo (Pb)	---	---	1.5 µg/m <sup>3</sup> (promedio aritmético en 3 meses)

Fuente: Valores publicados en el *Diario Oficial de la Federación* del de diciembre de 1994.

La Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, a través del Instituto Nacional de Ecología, emite normas para fuentes fijas y fuentes móviles, las cuales se mencionan en el apéndice A.

---

# *Capítulo 2*

---

## **CONTROL TECNOLÓGICO DE NO<sub>x</sub>, DESPUÉS DE LA COMBUSTIÓN**

En este capítulo se habla de las características de las emisiones de NO<sub>x</sub> producidas por los equipos industriales de combustión y se describe detalladamente el proceso denominado "Reducción selectiva no - catalítica".

Según Wood [2]. Considerando el grado de disminución de emisiones, se necesita conocer el tipo de combustible, diseño del sistema de combustión y los factores operacionales.

Los estudios atmosféricos han mostrado que la formación de ozono, es el resultado de una compleja reacción química que involucra compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Estos estudios indican que muchas áreas urbanas con relaciones mayores a 15: 1 (VOCs/NO<sub>x</sub>) pueden reducir los niveles de ozono ambientales, solamente con reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> que aportamos diariamente al ambiente.

Muchos de los equipos de combustión industrial, no han sido probados para conocer sus niveles de emisión de NO<sub>x</sub>. Por tal razón, es necesario conocer: Las emisiones de NO<sub>x</sub> en sistemas de combustión que varían y dependen del diseño, operación y condiciones del combustible.

Es importante probar cada equipo de combustión para verificar las emisiones características de NO<sub>x</sub>., este proceso de prueba debe ser dinámico, para que pueda proveer información necesaria y se tomen las decisiones, considerando la aplicabilidad de las tecnologías de control.

Para mejores resultados, las pruebas se harán referidas a tres puntos distintos de carga, donde estos representarán: un rango de operación normal con variación de oxígeno, esto es, con un bajo exceso de aire ( $O_2$  bajo); un segundo con exceso de aire alto ( $O_2$  alto); finalmente, se tendrá una línea intermedia, la cual será referida aproximadamente a la línea estequiométrica para tomarla como base de comparación.

## CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Dependiendo del combustible quemado, así como del diseño del sistema de combustión, se tiene todo un conjunto de tecnologías de control, que son utilizadas para disminuir hoy en día las emisiones contaminantes, donde estas opciones dependerán de cada sistema de combustión en particular.

Las emisiones de  $NO_x$  formadas durante los procesos de combustión, están en función de la composición del combustible, del modo de operación, del diseño de la caldera y del equipo de combustión. Cada uno de estos parámetros juega un papel significativo en las emisiones de  $NO_x$ .

Según Van[3], La formación de  $NO_x$ , se atribuye a tres distintos mecanismos:

Formación de  **$NO_x$  térmico** (mecanismo de Zeldovich): se forma directamente de una reacción de  $N_2$  y  $O_2$  gaseoso. Los parámetros más importantes en estos mecanismos de reacción son: la temperatura y el tiempo de residencia en la región de alta temperatura. Por eso el nombre de  $NO_x$  térmico. La razón de reacción se acerca a una curva exponencial que depende de la temperatura. Cuando se tienen dos flamas, con el mismo promedio de temperatura de flama con el perfil plano de temperaturas se producirían los niveles más bajos de  $NO_x$ . Abajo de cierto mínimo de temperaturas hay una formación de  $NO_x$ . En la literatura, los valores mínimos de esta temperatura se pueden establecer de  $850^\circ C$  a  $1,300^\circ C$ .

Formación de  **$NO_x$  puntual** (formación rápida): los factores que influyen en el mecanismo de formación instantánea de  $NO_x$  son:

- Concentraciones de átomos de oxígeno
- En flamas ricas en combustible, la producción de  $NO_x$  instantáneo es fuertemente promovido
- La temperatura es de menor influencia.

Formación de  **$NO_x$  por el nitrógeno del combustible**: la cantidad de  $NO_x$  producido depende del nitrógeno contenido en el combustible. Sin embargo, la relación es no lineal. La fracción de nitrógeno, el cual se convierte en  $NO$  decrece con un aumento de la concentración de  $N$ . La conversión de  $N$  para formar  $NO$  es para un grado alto independientemente de la temperatura. La concentración de  $O_2$  es un parámetro importante.

Según Lesli [4], las técnicas de disminución de los óxidos de nitrógeno, aplicadas aguas abajo de la zona de combustión para la disminución de los óxidos de nitrógeno, formados durante el proceso de combustión, son las siguientes:

- Reducción Selectiva Catalítica (SCR)
- Reducción No - Selectiva Catalítica (NSCR)
- Reducción Selectiva No - Catalítica (SNCR)

## REDUCCIÓN SELECTIVA CATALÍTICA

En este proceso el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), usualmente diluido con agua o vapor, se inyecta a través de una parrilla en el interior del tubo de gases de escape aguas arriba del catalizador. Sobre la superficie del catalizador, el amoníaco reacciona con los óxidos de nitrógeno para la formación de moléculas de nitrógeno y agua. Dependiendo del sistema diseñado, los óxidos de nitrógeno pueden ser removidos de un 80 a un 90% y ser altamente factible.

Las reacciones que ocurren en la presencia de un catalizador son las siguientes:



La reacción del amoníaco con los óxidos de nitrógeno se favorece bajo la presencia de un exceso de oxígeno. La primera variable que afecta la disminución de los óxidos de nitrógeno es la temperatura. La disminución óptima de los óxidos de nitrógeno ocurre cuando en el lecho del catalizador, la temperatura está entre 589 y 672 K para catalizadores convencionales (vanadio, titanio - base) y 516 a 539 K para catalizadores de platino. El rendimiento para un catalizador, depende de la temperatura de los gases de combustión.

Un catalizador dado exhibe su rendimiento óptimo entre un rango de temperatura de 283 K para aplicaciones donde las concentraciones del gas de combustión  $\text{O}_2$  son más grandes del 1%. Abajo de este rango de temperatura óptima, la actividad del catalizador se reduce grandemente dejando de reaccionar el amoníaco a través del escape. Alrededor de 1,310 K el amoníaco comienza a ser oxidado para formar óxidos de nitrógeno adicionales. La oxidación del amoníaco con los óxidos de nitrógeno se incrementa, aumentando la temperatura.

Dependiendo del material del catalizador, éste quizá se dañe rápidamente debido a los esfuerzos térmicos si se tienen excesos de temperatura mayores de 1,310 K, esto es importante, además de tener operaciones estables y en consecuencia temperaturas uniformes de los gases de combustión para este proceso, para la realización del control óptimo de los óxidos de nitrógeno.

Una nueva familia de catalizadores, construidos a base de zeolita, se han estado desarrollando, y se pretende que sean capaces de funcionar a más altas temperaturas que los catalizadores convencionales. Las zeolitas son efectivas en el rango 588 a 880 K, con la ventana de temperatura óptima estando entre 630 y 852 K. La oxidación del amoníaco para la formación de  $\text{NO}_x$  comienza alrededor de 728 K y es predominante para temperaturas mayores de 789 K. Las zeolitas sufren el

mismo rendimiento y problemas de daños potenciales, así como los convertidores convencionales cuando son usados fuera del rango óptimo de temperatura. En particular alrededor de 822 K, la estructura de la zeolita quizá se degrade irreversiblemente debido a la pérdida de la densidad de poro. Los catalizadores de zeolita continuamente no han estado operando comercialmente a temperaturas alrededor de 789 K debido a la oxidación del amoníaco para la formación del NO<sub>x</sub> y el daño potencial del catalizador.

Con los catalizadores de zeolita, la reacción para la disminución de NO<sub>x</sub> toma lugares dentro de un tamiz molecular de cuerpo cerámico, mejor dicho sobre la superficie de un catalizador metálico. Esta diferencia es reportada para reducir los efectos de partículas.

El rango de aplicación para este proceso es desde gas hasta carbón como combustible. Los niveles típicos de NO<sub>x</sub> se disminuyen en un 80 a 90%.

La eficiencia óptima del proceso catalítico depende de la relación NH<sub>3</sub> / NO<sub>x</sub>, la inyección del amoníaco debe de controlarse para dar una relación de 1:1. Como la relación mol de NH<sub>3</sub> / NO<sub>x</sub> incrementa aproximadamente 1:1, la disminución de NO<sub>x</sub> se incrementa, operando alrededor de una relación de 1:1 o que el volumen insuficiente del catalizador resultará que dejará de reaccionar el amoníaco deslizando a través del lecho del catalizador. Sobre el analizador de flujo y el control rápido de generación se requiere la optimización de la disminución de NO<sub>x</sub> y minimizar las emisiones de NH<sub>3</sub>.

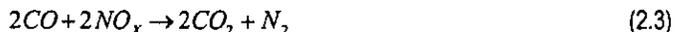
Otra variable que afecta la disminución de NO<sub>x</sub> es la velocidad de los gases, la relación del flujo de los gases de combustión para un catalizador o el inverso del tiempo de residencia.

## **REDUCCIÓN NO - SELECTIVA CATALÍTICA (NSCR)**

Los sistemas de reducción catalítica no - selectiva se refieren a la conversión de tres vías, los sistemas catalíticos disminuyen desde NO<sub>x</sub>, hidrocarburos no quemados y CO, simultáneamente.

Una apropiada operación de los procesos de combustión, con una relación de combustible, ligeramente rica en combustible. Debajo de esta condición, en la presencia de un catalizador, los óxidos de nitrógeno se disminuyen por el monóxido de carbono resultando nitrógeno y dióxido de carbono.

La reducción no - selectiva catalítica, utiliza la siguiente reacción en la disminución de NO<sub>x</sub>.



Los catalizadores usados para promover esta reacción es generalmente una mezcla de platino y rodio. Los límites de la temperatura de operación del catalizador son de 644 a 1,089 K, con 670 a 922 K siendo los más deseables.

## REDUCCIÓN SELECTIVA NO - CATALÍTICA (SNCR)

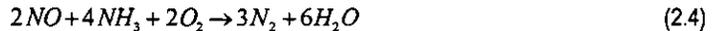
Existen dos sistemas comerciales disponibles:

- De NOx Térmico, usa amoníaco como el agente reductor.
- NOx Out, usa urea como el agente reductor.

Cada proceso tiene diferencias, pero el aprovechamiento de ambos procesos son similares.

El proceso De NOx Térmico, desarrollado por Exxon, es una técnica de control que reduce los NOx para formar N<sub>2</sub> sin el uso de un catalizador y consiste en inyectar amoníaco gaseoso para reaccionar con los NOx en el gas de combustión rico en aire.

El amoníaco y el NO<sub>x</sub> reaccionan acorde a las siguientes reacciones:



La reducción selectiva no - catalítica [5], es un proceso químico que cambia los óxidos de nitrógeno (NOx), en nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Utilizando un agente reductor, amoníaco o urea, el cual es inyectado hacia (cámara de combustión) los productos de la combustión. La inyección se hace a altas temperaturas (1,150 – 1,450 K), zona que se desea para que ocurra la reacción química. Otros químicos pueden ser también agregados para mejorar el desarrollo, reducir el mantenimiento de equipo y expandir el rango de temperatura dentro del cual la reducción selectiva no - catalítica es efectiva.

Conceptualmente, el proceso SNCR es muy simple. Un agente reductor de forma gaseosa o acuosa compuesto de nitrógeno, es inyectado y mezclado hacia los gases calientes de combustión en un adecuado rango de temperatura. El agente reductor entonces, sin necesidad de un catalizador, reaccionará con los NOx contenidos en los gases, convirtiéndolos en inofensivo nitrógeno molecular y vapor de agua. Al SNCR, se le llama selectivo ya que el agente reacciona principalmente con los NOx y no con oxígeno o con algún otro componente de los gases de combustión.

En casi todos los sistemas comerciales SNCR, se usan amoníaco o urea como el agente reductor. Otro agente pudiera ser ácido cianúrico e hydrazine, que también pueden ser usados. El amoníaco puede ser inyectado en forma (anhídrido o acuosa) y la urea como una solución acuosa (50% agua- 50% urea).

Los principales componentes de un sistema SNCR son: el almacenamiento, sistema de inyección, los cuales incluyen; tanques, bombas, inyectores y controles asociados y con frecuencia, monitores que muestran las emisiones continuas de NOx.

Dada la simpleza de estos componentes, la instalación del SNCR es relativamente más fácil para su instalación, que otra tecnología de control de NOx

En el diseño de un sistema SNCR, deben de ser considerados algunos factores para un correcto funcionamiento:

Tabla 2.1 Factores de funcionamiento.

<b>Condiciones del horno</b>	<b>Condiciones de los gases de combustión</b>	<b>Condiciones Ambientales</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propiedades del combustible</li> <li>• Geometría</li> <li>• Factor de carga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfiles de velocidad de los gases</li> <li>• Tiempo de residencia</li> <li>• Constituyentes químicos de los gases</li> <li>• Efectividad en la mezcla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presión</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Humedad relativa</li> </ul>

La reducción se encuentra limitada por los siguientes factores:

- Tiempo de residencia de los gases en el horno y la chimenea.
- Cantidad de amoníaco inyectado (si se tienen excesos de amoníaco, se pueden producir escurrimientos).

Estos factores pueden variar según el sistema (quemador - horno - combustible).

Es importante la caracterización de los gases de combustión (Temperatura, Velocidad, NOx), inmediatamente aguas abajo de la zona de inyección, donde los parámetros siguientes determinan los requerimientos necesarios de la mezcla.

- Cantidad de amoníaco nebulizado
- Registro de temperaturas dentro del horno
- Tiempo de residencia disponible para la reacción.

De tal manera, es de importancia que se determine el intervalo de temperaturas adecuado para las condiciones de inyección en condiciones de operación del horno.

Sin embargo, la reducción en las emisiones son comúnmente de un 30 - 75%. El primer sistema SNCR fue aplicado comercialmente en 1974. Como resultado, aproximadamente de 280 sistemas SNCR que han sido instalados mundialmente [4]. Las aplicaciones han incluido calderas industriales, calentadores, quemadores de desperdicios municipales y otras fuentes de combustión.



Figura 2.1 Diagrama de instalación del sistema de inyección que consiste en: una bomba recíproca (ubicada en la parte más alta del dibujo) que sirve para suministrar aire al depósito de amoníaco (tubo de vidrio transparente); válvula de regulación de suministro de  $\text{NH}_3$  hacia los gases de combustión y chimenea.

### **CANTIDAD DE $\text{NO}_x$ REMOVIBLE**

Mientras el desarrollo del SNCR es específico para cada aplicación única. Los niveles de reducción de  $\text{NO}_x$  tienen un rango de 30 a 75%.

La temperatura, el tiempo de residencia, la tasa de inyección de amoníaco, la mezcla entre el agente reductor, los gases de combustión y los niveles no controlados de  $\text{NO}_x$ , son importantes en la determinación de la efectividad del SNCR. En general, si los  $\text{NO}_x$  y el amoníaco están en contacto a la temperatura adecuada durante un tiempo suficiente, el SNCR será eficiente en la reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

El SNCR podrá remover la mayoría de los  $\text{NO}_x$  dentro de un rango específico de temperatura y puede ser ampliado con el incremento del tiempo de residencia ( $>0.5$  segundos); por otro lado la temperatura óptima promueve relativamente una reducción alta de  $\text{NO}_x$ .

La relación estequiométrica normal (REN) es el término usado para describir la relación molar  $\text{NH}_3$  /  $\text{NO}_x$  del agente inyectado para las concentraciones no controladas de  $\text{NO}_x$ . Si una mol de anhídrido de amonio es inyectada por cada mol de  $\text{NO}_x$  en los gases de combustión, la (REN) es uno, como una mol de amoniaco reaccionará con una mol de  $\text{NO}_x$ . Si una mol de urea es inyectada hacia los gases de combustión para cada mol de  $\text{NO}_x$ , la REN es dos. Esto es debido a que una mol de urea reaccionará con 2 moles de  $\text{NO}_x$ . Para ambos reactantes, a mayor REN, mayor nivel de reducción de  $\text{NO}_x$ . Incrementando la REN más allá de un cierto punto, sin embargo, habrá un efecto de disminución en la reducción de  $\text{NO}_x$  con la utilización del reactante disminuyendo más allá del punto.

## ESCURRIMIENTOS DE AMONIACO

El deslizamiento de amonio o las emisiones de amoniaco, las cuales son el resultado de la reacción incompleta de los reactantes en la reducción de  $\text{NO}_x$ , típicamente pueden ser limitados a niveles bajos.

El deslizamiento de amoniaco puede provocar uno o más problemas: Formación de bisulfato de amonio o sales de amonio, las cuales pueden tapar o corroer la tubería y otros componentes aguas arriba.

- Formación de cloruro de amonio blanco en la chimenea.
- Detección de un olor de amoniaco alrededor de la planta

Los escurrimientos de amoniaco son controlados cuidadosamente mediante la inyección de reactantes hacia las regiones del horno o cualquier otra fuente donde se tengan las condiciones adecuadas (temperatura, tiempo de residencia, concentraciones), para la reacción existente del SNCR. Si el amoniaco o urea, se inyecta en regiones donde la temperatura es demasiado baja para la reacción en la reducción de  $\text{NO}_x$ , puede ocurrir en un tiempo de residencia disponible, entonces algo de amoniaco que no reacciona puede ser emitido. Además, si el reactante es inyectado de tal manera que algunas regiones del horno están sobretratadas, el exceso de reactante puede producir escurrimientos de amoniaco. Por lo tanto, es muy importante que el sistema de inyección del SNCR sea diseñado para proveer la apropiada distribución de reactivos.

Mientras la dificultad en el control de los escurrimientos de amoniaco varía de aplicación en aplicación, éste, generalmente puede ser controlado en emisiones menores de 25 ppm en la chimenea. En muchas instalaciones comerciales, el escurrimiento de amoniaco ha sido garantizado en emisiones menores a 5 - 10 ppm corriente arriba del aire caliente en los sistemas SNCR para encontrar los requerimientos.

## LIMITACIONES DEL SNCR

El SNCR tiene limitaciones, las cuales serán atendidas en orden de uso para el adecuado control de las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

**Altas temperaturas y concentraciones críticas de NOx.** A incrementos de temperatura, la concentración crítica o de equilibrio de NOx será dada por el incremento en la concentración de oxígeno. A temperaturas suficientemente altas, cualquier reducción de NOx más allá de los niveles críticos hechos por el SNCR será neutralizado por la oxidación rápida del nitrógeno para volver a formar NOx. Por esta razón, a temperaturas suficientemente altas y partiendo de una línea base de NOx más allá de las concentraciones críticas, la inyección de amoníaco o urea hacia los gases de combustión, creará un incremento en los niveles de NOx.

**Concentraciones de CO en altos hornos.** Concentraciones altas de CO pueden cambiar la ventana de temperatura del proceso SNCR, cuando las concentraciones de CO en la región de inyección de amoníaco está alrededor de 300 ppm, los niveles críticos de NOx y el índice de reacción del SNCR se incrementará. Por esta razón, en algunos hornos con niveles altos de CO, es preferible inyectar a temperaturas bajas, para que se tenga un control adecuado de NOx. [4]

**Emisiones de monóxido de carbono.** En un sistema SNCR, bien controlado el carbón contenido en la urea, se oxidará completamente para formar CO<sub>2</sub>. Si la reacción del SNCR no se controla adecuadamente, esto significaría un incremento en las emisiones de CO.

Una vez vistos los mecanismos de reacción que dan origen a los NOx, concluimos que el más adecuado sistema de control para las necesidades planteadas, según los objetivos, es el SNCR (Reducción selectiva no - catalítica), ya que el agente reductor es fácil de conseguir, así como de almacenar (amoníaco). Además, nos permite un fácil manejo de inyección, el volumen requerido es almacenado en un depósito pequeño, ya que será necesario solo de 1.5 a 2, en la relación NH<sub>3</sub> / NOx en ppm.

---

# *Capítulo 3*

---

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En esta parte se explica el desarrollo experimental utilizado, consistente en la construcción de un sistema para que se lleve a cabo el proceso de combustión que consiste en horno, chimenea y quemador de premezcla, para el cual se hace una amplia descripción. Además, se describe la instalación de la alimentación del combustible, así como el sistema de inyección de amoníaco. Por último, se mencionan los pasos a seguir para la realización del experimento.

### **CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PARA LA COMBUSTIÓN: HORNO, QUEMADOR Y CHIMENEA.**

Para el hogar, se utilizó un tubo de concreto de diámetro interior 0.381 m (15") por 1 m de largo, en la pared externa se aisló primero con una capa de lana mineral con un espesor de 0.05 m después se cubrió con papel aluminio, tratando de tener la menor cantidad de pérdidas de calor a través de las paredes. A esta parte del tubo se le hicieron cuatro orificios y se empezó de la base hacia arriba; el primero a 0.5 m y de ahí en adelante uno cada 0.15 m.

Como chimenea se usó un tubo de lámina galvanizada con un diámetro interior igual al del horno y de largo 1 m, y se aisló de la misma manera que al horno. A la chimenea se le hizo solo un orificio situado a 0.15 m arriba del último que se le hizo al tubo de concreto.

Para sujetar la lana mineral a las paredes de ambos tubos, se utilizó malla de alambre.

Además, en la chimenea se instaló regulación de gases de combustión para incrementar su tiempo de residencia (tr).

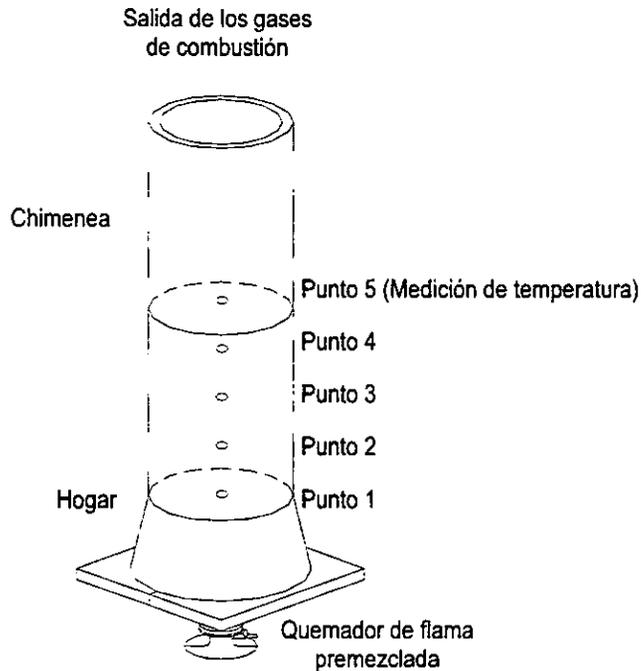


Figura 3.1 Modelo experimental

Al utilizar este horno, se tuvieron los siguientes beneficios:

- Se obtuvieron temperaturas de más de 1,000K con esto las emisiones de NOx aumentaron. Por lo cual, se pudo llevar a cabo el experimento.
- Con el quemador de premezcla, el consumo de combustible durante toda la experimentación fue de 30 litros.
- Se tenía un tiro natural creado por la chimenea.
- Se permitió un buen manejo de la flama, además de su clara visualización.
- Manejo óptimo de los gases de combustión ( al incrementar  $tr$  se incrementó la concentración de NOx). Cuando no se tiene control de  $tr$ , hay autoextinción en la flama.

## DESCRIPCION DEL QUEMADOR UTILIZADO

Un quemador, por causas inherentes a la distribución del gas, puede alimentarse en distintos momentos con mezclas de gas de diferentes características y distintas presiones de distribución. Para poder afrontar de manera satisfactoria las más severas condiciones de trabajo a que puede verse sometido, es necesario que tenga una gran "versatilidad", de forma que sea capaz de garantizar ante todo la estabilidad de llama.

El quemador utilizado es un quemador Bunsen, el cual basa su principio de funcionamiento en la mezcla del gas con aire, mezcla que se obtiene aprovechando la presión del gas.

El gas sale por una tobera situada en la base del tubo del quemador, cerca de la abertura que sirve como aspiración de aire primario, (perilla circular que puede ser abierta o cerrada con solo dar vuelta). Por el efecto del chorro de gas, se crea en la zona una depresión que facilita la aspiración de aire, además de facilitar la mezcla, que fluye por todo el tubo, teniendo una velocidad tal que impide que la llama que se forma después de la ignición en la parte libre, penetre en el interior del quemador.

El quemador cuenta con una boquilla, la cual tiene ocho orificios pequeños por donde sale la mezcla (aire - combustible), estos orificios tienen un diámetro de 0.0005 m, localizados polarmente en forma de círculo, como se describe en la siguiente figura:

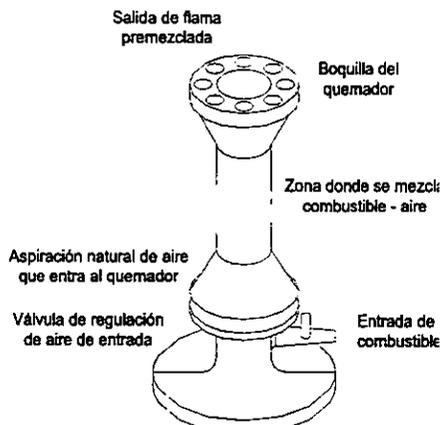


Figura 3.2 Quemador Bunsen, utilizado en la experimentación

La figura 3.2 describe al quemador de premezcla utilizado en el experimento. Con éste se tuvieron gastos volumétricos de  $7.86 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . La formación de los óxidos de nitrógeno se ve favorecida con la temperatura (Temperaturas en el horno mayores de 1,473 K), presión y exceso de aire. Utilizando éste combustible y las condiciones adecuadas de combustión, se llegaron a formar hasta 125 ppm en las emisiones de NOx.

## DESCRIPCION DE LA INSTALACION: HORNO Y CHIMENEA

El horno y chimenea, son dos tubos cubiertos de lana mineral, sujeta mediante una malla de alambre. Asimismo los dos tubos fueron cubiertos con papel aluminio, para disminuir las pérdidas por transferencia de calor hacia el medio ambiente. Los dos tubos se encuentran soportados por una base, de ladrillos en dos columnas de 3 ladrillos de 0.71 m X 0.127 m X 0.127 m y tienen una separación de 0.24 m entre si, sobre éstas se colocaron dos ladrillos refractarios de 0.3 m X 0.15 m X 0.025 m, de forma perpendicular a las columnas, cada ladrillo cuenta con una media luna, para que en ésta quede colocada la boquilla del quemador con un diámetro de 0.0035m, evitando la entrada de aire no deseado.



Figura 3.3. Instalación del sistema

## **INSTALACION DEL SUMINISTRO DEL COMBUSTIBLE (GAS L.P.)**

La tubería de suministro de gas se encuentra conectada a un tanque de 30 litros a presión para contener Gas L.P. Toda la tubería es de un diámetro de 0.00127 cm (1/2 pulgada), hecha de cobre flexible así como las conexiones y válvulas.

A continuación, se describe la instalación que se encuentra conectada del tanque hacia el quemador:

Del tanque de alimentación de combustible sale un tubo con longitud de 7 m, para ser conectado a una válvula de seguridad; de ahí se conecta a un rotámetro que mide el gasto de combustible. En la parte baja del rotámetro sale otro tubo, con longitud de 3 m, que es conectada a un manómetro para medir la presión de entrada al quemador, cabe aclarar que para realizar la instalación se consultó Norma Oficial Mexicana.

Para una mayor seguridad, siempre estuvo cerca del área de trabajo, un extinguidor.

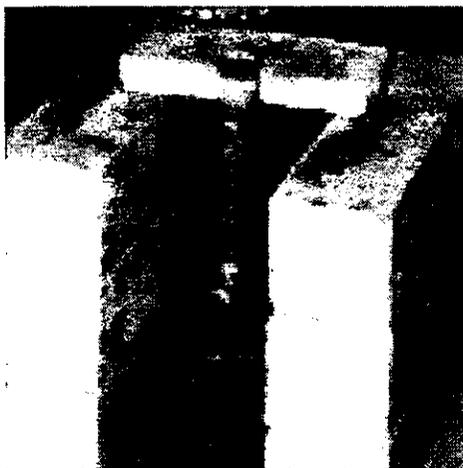


Figura 3.4. Instalación del suministro de combustible, hacia el quemador Bunsen

## **DISEÑO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL**

Una vez hecha la instalación del sistema de combustión, así como la alimentación del combustible, se procedió a realizar durante varios días la quema de Gas L.P. con la intención de alcanzar temperaturas

mayores a 1,000K y con esto una formación en las emisiones de NOx mayores a 100 ppm. En esta parte del proyecto, se caracterizó la distribución de temperatura del sistema para poder determinar la adecuada región de inyección. Asimismo, se determinaron las condiciones necesarias, tanto de exceso de aire como de tiempo de residencia de los gases combustión y se logra restringiendo la salida de los gases en la chimenea; ya que estos dos parámetros fueron de gran importancia, pues de ellos depende el lograr concentraciones de NOx de 125 ppm. Sin embargo, el restringir demasiado la salida de los gases de combustión trae como consecuencia mayor formación de CO. Por el contrario, si esta restricción no es suficiente, no se logran altas emisiones de NOx.

Por otra parte, el exceso de aire también es un factor importante, ya que si la cantidad de este es poco o casi nulo, esto nos convierte de una flama premezclada en una flama difusiva. Por el contrario, si la cantidad de aire es mayor, se tendrán flamas demasiado frías, logrando bajas emisiones de NOx. De tal manera que experimentalmente tuvieron que encontrarse condiciones en donde las temperaturas fueran más de 1000K y emisiones de NOx mayores de 100ppm para la obtención de emisiones altas que pudieran ser medibles, además de ser útiles en la experimentación.

Esta caracterización consistió básicamente, en la medición de temperaturas en cada uno de los puntos seleccionados. Los puntos 1 al 4 se hicieron en la cámara de combustión, el quinto en la chimenea, para con esto, obtener un mapeo del sistema. Asimismo, se obtuvieron lecturas de NOx, CO, CO<sub>2</sub>, y O<sub>2</sub> con un analizador de gases (Bacharach 300 NSx) que se muestran en la figura 3.1.

Los datos obtenidos se utilizaron para el desarrollo del sistema de reducción selectiva no catalítica e identificar el intervalo óptimo de temperaturas, lugar donde se llevará a cabo la inyección del reactante.

## **DISEÑO, SELECCIÓN Y CONTROL DEL EQUIPO DE INYECCION**

Una vez identificada la región de inyección, se necesita ahora:

Nebulizar el amoniaco.- las gotas deberán ser lo más pequeñas posibles, para que éstas entren en íntimo contacto con los gases de combustión y se pueda dar una óptima reducción, así como una mezcla adecuada.

Regular el amoniaco, ya que serán necesarias 1 ppm de reactante por cada 2 ppm de gases de NOx.

Tubería de material que no tuviera aleaciones de cobre o de alguna otra especie que pudiera reaccionar con el amoniaco, formando compuestos no deseables.

La presión en la boquilla de inyección debe de ser tal, que sea capaz de vencer el flujo de gases de combustión. Además de las pérdidas a través de la tubería y equipo de regulación.

## BOQUILLA DE INYECCION DE ACERO INOXIDABLE

La boquilla de inyección es colocada de tal manera, que se encuentra en dirección contraria al flujo de los gases de combustión. Se utilizó tubería de 0.005 m de diámetro, la boquilla de inyección fue situada tanto en el punto 2 como en el punto 3, según en donde se desee inyectar. Esto se logró con un cambio de un tramo de tubería.

Para regular el flujo inyectado hacia los gases de combustión, fue necesario utilizar una válvula de precisión, conectada en la parte baja del depósito de amoniaco con capacidad de .030 litros.

El depósito contaba con marcas especiales, las cuales permitían tomar lecturas fácilmente.

El depósito construido de material de vidrio (diámetro de 0.05 m, en forma de tubo), estaba conectado a una bomba recíproca, la cual proporcionaba presión al sistema. Esta se utiliza para vencer las pérdidas por arrastre en la tubería y las pérdidas de presión por la boquilla. El aire suministrado por la bomba solo ayudó a vencer las pérdidas y no se mezcló con el reactante, que es inyectado hacia la cámara de combustión.

## PROTOCOLO DE EXPERIMENTACION

A continuación se hace mención de las indicaciones a seguir para realizar el experimento. El sistema de experimentación consta de:

<b>Sistemas</b>	<b>Instrumentos</b>
Gas LP SNCR (Inyección)	Medidor de gas (rotámetro) Medidor Bacharach 300 NSx Termopar Fluke Manómetro Cronómetro

Las indicaciones se hacen con la intención de tener un manejo cuidadoso de los sistemas que comprenden el experimento, para evitar posibles daños en los mismos.

## PROTOCOLO PARA EL SISTEMA DE COMBUSTIBLE (GLP)

Al inicio se tienen todas las válvulas cerradas.

1. Se abre la válvula del tanque de gas.
2. Se acerca fuego a la boca del quemador, abriendo poco a poco la válvula del rotámetro, el cual permite regular el combustible hasta que se obtenga una flama estable.

3. Con el rotámetro a  $3.93 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  se deja calentando el horno durante 45 minutos.
4. Durante otros 45 minutos se calienta, pero con un flujo de  $10 \text{ ft}^3/\text{h}$ , para sumar así 1 hora 30 minutos de calentamiento del horno.

Al terminar

1. Se establece un flujo volumétrico de  $5 \text{ ft}^3/\text{h}$  durante media hora para dejar enfriar el horno.
2. Se establece un mínimo de flujo volumétrico aproximadamente  $2$  ó  $3 \text{ ft}^3/\text{h}$ , durante otra media hora.
3. Se cierran todas las válvulas: tanque y entrada al quemador.

### **PROTOCOLO DEL SISTEMA DE INYECCIÓN (SNCR)**

Al iniciar, el depósito que contiene amoniaco se encuentra parcialmente lleno. La válvula de paso cerrada y la bomba reciprocante apagada.

1. Se conecta el motor que acciona la bomba de pistón; la cual manda aire a la parte superior del depósito de amoniaco, para ejercer presión sobre el líquido. (Sin mezclarse aire - amoniaco).
2. El horno que se encuentra caliente hasta aproximadamente  $1,773 \text{ K}$  y con emisiones de  $\text{NO}_x$  de aproximadamente  $125 \text{ ppm}$ , con la salida de los gases parcialmente cerrada (para garantizar tiempo de residencia adecuado), se abre la válvula de aguja para dar paso a la cantidad de amoniaco necesaria que será inyectada a los gases de combustión.
3. Revisar visualmente si el amoniaco se nebuliza en el punto de inyección.
4. Iniciar mediciones con el Bacharach 300 NSx.

Al terminar

1. Apagar el motor que acciona la bomba reciprocante.
2. Cerrar la válvula que permite el paso de amoniaco.

### **PROTOCOLO DEL BACHARACH 300 NSX**

Al empezar

1. Verificar que este cargada la batería.
2. Desenrollar la manguera de la sonda.
3. Prenderlo y esperar la alarma CAL.
4. Al aparecer la alarma "CAL" presionar el botón "Calibration", para que se autocalibre la sonda de oxígeno, cuidando que la sonda este fuera de cualquier emisión.
5. Al aparecer la alarma de "Fuel" en el monitor, escoger la opción "LPG" como combustible.

6. Cuando se vaya a medir emisiones de NOx, apretar el botón "Run" para que funcione la bomba de vacío del Bacharach 300 NSx.
7. Al acabar de medir oprimir la tecla "Run" para que el instrumento de medición quede en modo de espera (stand by), para las siguientes mediciones. Si es necesario purgar dejando en modo "Run" la sonda a la atmósfera.

Al terminar

1. Antes de apagarlo, si la sonda esta muy caliente dejarlo corriendo a la atmósfera para que se enfríe y se realice un purgado de la misma.
2. Una vez listo, enrollar la manguera de la sonda y guardarlo.
3. Si es necesario, dejar cargando la batería toda la noche.

En conclusión, hasta esta parte del proyecto, tenemos que la construcción del horno y la chimenea es adecuada, ya que nos permite cumplir con la última parte de los objetivos planteados. Además, se encontraron, las condiciones adecuadas, después de estar mediante prueba y error, tanto en la restricción de los gases de combustión para lograr un mayor tiempo de residencia, así como, con la entrada de aire que es mezclado con el combustible, logrando tener altas emisiones de NOx, que fueran representativas en la experimentación.

---

# Capítulo 4

---

## **ANALISIS DE RESULTADOS**

Concluido el diseño experimental, en el subsecuente capítulo, se reporta cómo se efectuó la producción de óxidos de nitrógeno, quemando Gas L.P. como combustible, para después pasar a la parte de la reducción. Recordando que según Lesli [4] y el Institute of Clean Air Companies [5], por cada mol de NOx en la combustión, necesitamos  $\frac{1}{2}$  mol de reactivo (NH<sub>3</sub>). Tomando en cuenta esto, se reporta un mapeo de temperaturas y se obtienen las tablas de las dos fases.

## **PARAMETROS Y VARIABLES CONSIDERADAS**

Se estudiaron los más característicos y sobre todo los que influyen en los resultados del análisis de gases de combustión, en un sistema que comprende: quemador de flama premezclada, hogar y chimenea. Debemos decir que el quemador de premezcla proporciona una flama que alcanza temperaturas de 1,465.7 K. Para variar la cantidad de aire primario a la flama premezclada, se cuenta con una perilla en la base del quemador.

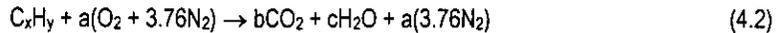
## **EXCESO DE AIRE**

La variación de combustible que alimenta al quemador es posible con la válvula del rotámetro. El aire primario que se mezcla con el combustible para reaccionar, se puede manipular con la perilla que se encuentra en la base del mismo. De esta manera, el tener una relación aire - combustible real variable, el numerador de la ecuación varía, teniendo así  $\phi$  variable.

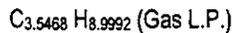
$$\phi = \frac{AC_{real}}{AC_{estequiometrica}} \quad (4.1)$$

Para el cálculo del numerador ( $AC_{real}$ ) se utilizó un programa, que se describe en el apéndice B y para  $AC_{teórico}$  se calculó de la siguiente forma.

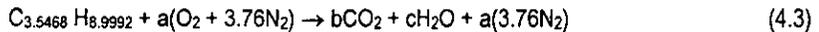
Se tiene un combustible (Gas L.P.)



donde el combustible utilizado es:



sustituyendo:



despejando y encontrando valores:

$$C: 3.5468 = b$$

$$H: 8.9992 = 2c \Rightarrow c = 4.4996$$

$$O: 2a = 2(3.5468) + 4.4996 \Rightarrow a = 5.7966$$

$$N: 3.76a = 3.76a$$

donde la ecuación queda:



$$AC_{teórico} = \frac{5.7966(4.76)(28.97)}{3.5468(12.01115) + 8.9992(1.0079)} = 15.4693 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ combustible}}$$

Durante la primera fase de experimentos se obtuvieron los resultados, los cuáles son reportados en la tabla 4.1. En ésta se muestran los valores de los productos de la combustión ( $NO_x$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ), los cuáles fueron tomados con un equipo de medición "analizador de gases Bacharach 300 NSx" del Laboratorio de Termofluidos, que pertenece a la Facultad de Ingeniería, UNAM. Los valores de  $AC_{real}$ ,  $\phi$  y Exceso de aire (%), se obtienen con la ayuda del cálculo descrito anteriormente y el programa citado en el apéndice B.

## DIAGRAMA DE OSTWALD

Según Salvi [6]. La valoración del exceso o defecto de aire empleado durante la combustión puede efectuarse fácilmente por medio de diagramas triangulares, estudiados por Ostwald.

Estos diagramas permiten relacionar cuatro porcentajes volumétricos: % de CO<sub>2</sub>, % de CO, % de O<sub>2</sub> y % de exceso de aire; conociendo dos de estos porcentajes, es posible encontrar el valor de los otros dos.

Para la construcción del diagrama, es necesario conocer la composición en tanto por ciento del combustible y admitir que durante la combustión no haya formación de hollines. Además, es preciso que todo el hidrógeno del combustible arda completamente y que el único producto de combustión incompleta presente en los humos sea el CO.

El diagrama está formado por un triángulo rectángulo, sobre uno de cuyos catetos, como eje de abscisas, se colocan los porcentajes de O<sub>2</sub> ( $w$ , el valor máximo corresponde a la concentración atmosférica), y sobre el otro cateto, como ordenadas, los tantos por ciento de CO<sub>2</sub> ( $\alpha$ , el valor máximo corresponde a la cantidad estequiométrica derivada de la combustión teórica del combustible que se examina). La hipotenusa, obtenida uniendo los extremos de ambos catetos, constituye el conjunto de puntos caracterizados por la combustión completa del carbono del combustible, con diferentes excesos de aire; los valores del % de CO constante están representados por una familia de segmentos paralelos a la misma hipotenusa ( $\beta$ ).

La separación entre la zona correspondiente a la combustión con exceso de aire y la zona con defecto de aire se obtiene trazando desde el vértice del CO<sub>2</sub> un segmento sobre el cateto del oxígeno en el punto correspondiente al valor (% O<sub>2</sub>) dado por la expresión:

$$O_2 = \frac{CO_2max}{2 + \frac{CO_2max}{100}} \quad (4.5)$$

Este segmento corresponde a las condiciones de combustión estequiométrica; los valores del exceso de aire constante vienen dados por los segmentos paralelos a dicho segmento a la derecha de éste, y los valores por defecto vienen dados por los segmentos, siempre paralelos, a su izquierda.

En el caso del exceso de aire ( $n$ ), toma valores positivos, y valores negativos en caso de defecto de aire.

A cada combustible corresponde, como hemos dicho, un diagrama de Ostwald cuya validez está limitada al campo de la combustión del carbono, con CO<sub>2</sub> y CO sin formación de hollines ni de otros productos de combustión incompleta distintos al CO.

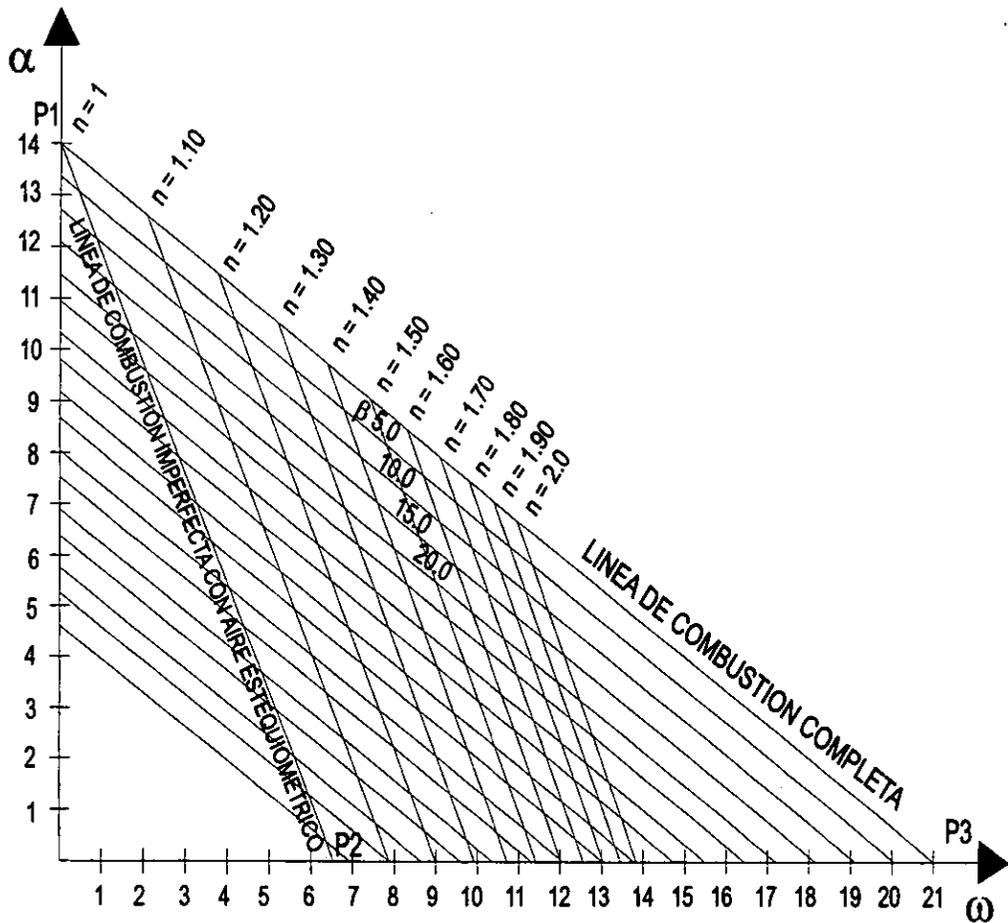


Diagrama 4.1 Diagrama de Ostwald

Este diagrama de Ostwald se refiere específicamente al Gas, L.P., el cual se utilizó durante la experimentación, usando la composición antes descrita en la tabla del apéndice C. Para la construcción de este diagrama, se utilizaron los cálculos descritos en el apéndice D.

De tal manera, que si conocemos 2 valores cualesquiera de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}$ , con la ayuda de este diagrama se puede determinar el 3°, de estos valores, así como el índice de exceso de aire ( $n$ ).

Este proceso es otra forma de cunatificar los productos de la combustión y compararlos con los obtenidos mediante el analizador de gases.

**Tabla 4.1 FORMACIÓN DE OXIDOS DE NITROGENO  
A RELACION ESTEQUIOMETRICA VARIABLE**

<b>NOx</b>	<b>CO</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Relación</b>	<b>φ</b>	<b>EA</b>
<b>(ppm)</b>	<b>(ppm)</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>Aire/Com</b>		<b>%</b>
99	754	0.1	13.7	15.739	1.017	1.7
100	290	0.2	13.7	15.782	1.020	2.0
96	177	0.2	13.7	15.797	1.021	2.1
95	130	0.2	13.7	15.804	1.022	2.2
95	118	0.2	13.7	15.805	1.022	2.2
102	88	0.2	13.7	15.809	1.022	2.2
95	108	0.3	13.6	15.923	1.029	2.9
104	96	0.3	13.6	15.924	1.029	2.9
103	94	0.3	13.6	12.924	1.029	2.9
100	87	0.3	13.6	15.925	1.029	2.9
102	79	0.3	13.6	15.927	1.030	3.0
105	78	0.3	13.6	15.927	1.030	3.0
105	67	0.3	13.6	15.928	1.030	3.0
105	67	0.3	13.6	15.928	1.030	3.0
110	116	0.5	13.5	16.021	1.036	3.6
108	104	0.5	13.5	16.022	1.036	3.6
105	87	0.5	13.5	16.025	1.036	3.6
105	76	0.5	13.5	16.026	1.036	3.6
109	60	0.5	13.5	16.028	1.036	3.6
106	58	0.5	13.5	16.029	1.036	3.6
111	91	0.4	13.5	16.043	1.037	3.7
112	88	0.4	13.5	16.043	1.037	3.7
101	84	0.4	13.5	16.044	1.037	3.7
105	76	0.4	13.5	16.045	1.037	3.7
105	72	0.4	13.5	16.045	1.037	3.7
107	71	0.4	13.5	16.046	1.037	3.7
105	69	0.4	13.5	16.046	1.037	3.7
108	60	0.4	13.5	16.047	1.037	3.7
107	59	0.4	13.5	16.047	1.037	3.7
102	66	0.6	13.4	16.147	1.044	4.4
101	64	0.6	13.4	16.147	1.044	4.4
110	62	0.6	13.4	16.148	1.044	4.4
112	60	0.6	13.4	16.148	1.044	4.4
111	58	0.8	13.3	16.251	1.051	5.1
113	64	0.7	13.3	16.269	1.052	5.2
112	59	0.7	13.3	16.269	1.052	5.2
113	58	0.9	13.2	16.374	1.058	5.8
116	62	1.1	13.1	16.479	1.065	6.5
118	60	1.1	13.1	16.479	1.065	6.5
114	59	1	13.1	16.499	1.067	6.7
118	60	1.4	12.9	16.715	1.081	8.1
113	59	1.3	12.9	16.736	1.082	8.2
119	61	1.5	12.8	16.845	1.089	8.9
122	63	2.1	12.4	17.348	1.121	12.1
121	63	2.3	12.3	17.468	1.129	12.9
112	76	2.2	12.3	17.486	1.130	13.0
120	62	2.2	12.3	17.489	1.131	13.1

**Tabla 4.1 FORMACIÓN DE OXIDOS DE NITROGENO  
A RELACION ESTEQUIOMETRICA VARIABLE**

<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>CO</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Relación</b>	<b>φ</b>	<b>EA</b>
<b>(ppm)</b>	<b>(ppm)</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>Alre / Com</b>		<b>%</b>
125	65	2.4	12.2	17.611	1.138	13.8
121	63	2.4	12.2	17.611	1.138	13.8
120	102	2.6	12.1	17.729	1.146	14.6
118	98	2.6	12.1	17.730	1.146	14.6
120	103	2.5	12.1	17.750	1.147	14.7
119	103	2.5	12.1	17.750	1.147	14.7
119	102	2.5	12.1	17.750	1.147	14.7
119	101	2.7	12	17.877	1.156	15.6
118	100	2.7	12	17.877	1.156	15.6
116	98	2.7	12	17.878	1.156	15.6
113	120	2.9	11.9	18.003	1.164	19.4
114	110	2.9	11.9	18.005	1.164	16.4
116	63	2.9	11.9	18.013	1.164	16.4
113	121	3.1	11.8	18.134	1.172	17.2
110	70	3.1	11.8	18.143	1.173	17.3
108	63	3.1	11.8	18.144	1.173	17.3
114	63	3.1	11.8	18.144	1.173	17.3
116	119	3	11.8	18.155	1.174	17.4
111	123	3.2	11.7	18.288	1.182	18.2
113	81	3.4	11.6	18.432	1.191	19.1
115	78	3.4	11.6	18.432	1.192	19.2
119	59	3.3	11.6	18.457	1.193	19.3
112	76	3.5	11.5	18.593	1.202	20.2
116	60	3.5	11.5	18.596	1.202	20.2
112	76	3.6	11.4	18.756	1.212	21.2
119	61	3.6	11.4	18.759	1.213	21.3
112	60	3.9	11.2	19.071	1.233	23.3
109	91	4.2	11	19.389	1.253	25.3
108	76	4.6	10.8	19.704	1.274	27.4
112	56	4.6	10.8	19.708	1.274	27.4
108	55	4.7	10.7	19.892	1.286	28.6
110	52	4.8	10.6	20.080	1.298	29.8
110	52	5	10.5	20.248	1.309	30.9
108	51	5.4	10.2	20.818	1.346	34.6
106	76	5.6	10.1	20.994	1.357	35.7
107	49	5.8	10	21.185	1.369	36.9
106	47	5.9	9.9	21.399	1.383	38.3
104	64	7	9.2	22.912	1.481	48.1
102	39	7	9.1	23.199	1.500	50.0

Nota: Los valores de los productos de la combustión, fueron tomados mediante el analizador de gases Bacharach 300 NSx del Laboratorio de Máquinas Térmicas, Facultad de Ing. UNAM.

donde se tienen, las siguientes consideraciones:

- $AC_{real}$  = Relación aire combustible real (variable independiente)
- $\phi_{variable}$  = Relación estequiométrica variable (variable independiente)
- EA (%) = Exceso de aire (calculado, asimismo, comprobado con la lectura obtenida)
- NO<sub>x</sub> (ppm) = Emisiones de Oxidos de nitrógeno, que son arrojados al ambiente a través del sistema.
- CO (ppm) = Emisiones de Monóxido de carbono.
- O<sub>2</sub> (%) = Emisiones de Oxígeno.
- CO<sub>2</sub> (%) = Emisiones de Dióxido de carbono.

## MAPEO DE TEMPERATURAS EN EL SISTEMA DE COMBUSTION

Como recordaremos en la figura 3.1, se describe el sistema de combustión y se localizan los puntos donde se tomaron las temperaturas con la ayuda de un termopar digital, Marca Fluke, Modelo 52 K/J.

El mapeo de temperaturas se hizo a la par, con las mediciones de los productos de la combustión. Fue necesario la realización de este mapeo para poder determinar el o los puntos óptimos de inyección de amoniaco. Como se menciona en el capítulo 2, la temperatura es la primera variable para controlar la reacción selectiva, en donde Leslie [4] recomienda un rango adecuado entre 1,150 - 1,450 K. Los resultados de estas mediciones son reportados en la tabla 4.2. Además de las temperaturas, se reporta el tiempo (segundos) que tardó en alcanzar la temperatura deseada, aclarando que una vez llegado al máximo de 1,465.7 K se estabiliza y no continúa incrementándose, debido a que el sistema alcanza su estado estacionario.

## CARACTERISTICAS AMBIENTALES

En la experimentación de cualquier fenómeno, las características que lo rodean son de vital importancia; para nuestro experimento en particular el ambiente juega un papel importante, ya que el aire primario que es introducido al quemador es tomado a condiciones ambientales de la Ciudad de México.

Por citar un ejemplo, el experimento no se comportaría de la misma forma a nivel del mar, que al nivel de la Ciudad de México, sobre todo en procesos de combustión. Si tomamos el aire a una presión diferente a la del nivel del mar, la temperatura de la flama, sera diferente, ya sea más fría o bien más caliente, dependiendo de la presión atmosférica del lugar en que nos encontremos.

**Tabla 4.2 Mapeo de temperaturas, a través del sistema horno y chimenea**

<b>Punto 1 [K]</b>	<b>Punto 2 [K]</b>	<b>Punto 3 [K]</b>	<b>Punto 4 [K]</b>	<b>Punto 5 [K]</b>	<b>Punto 6 [K]</b>	<b>Calentamiento [horas]</b>
1,306.7	1,214.2	1,132.6	1,095.3	965.2	721.6	1:30
1,311.3	1,217.2	1,136.7	1,097.1	967.9	729.4	1:35
1,369.3	1,263.4	1,195.0	1,144.6	1,056.5	757.5	1:40
1,373.9	1,279.4	1,201.7	1,146.5	1,058.3	761.6	1:45
1,389.8	1,300.2	1,217.9	1,170.3	1,071.3	791.4	1:50
1,393.1	1,302.8	1,218.2	1,173.5	1,073.8	795.0	1:55
1,419.4	1,325.6	1,233.9	1,185.2	1,091.5	828.8	2:00
1,427.5	1,329.7	1,238.6	1,188.7	1,096.1	835.1	2:05
1,428.5	1,331.8	1,246.3	1,190.8	1,107.4	852.8	2:10
1,433.0	1,338.8	1,251.0	1,193.1	1,110.5	859.0	2:15
1,458.5	1,366.2	1,268.6	1,217.6	1,118.0	875.1	2:20
1,465.7	1,372.6	1,272.0	1,223.0	1,123.8	879.2	2:25

\* El punto 6 corresponde a la salida de los gases, en la chimenea.

El flujo de combustible utilizado, se mantuvo constante,  $7.8657 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  al igual que el exceso de aire, con 14 de % exceso de aire.

Las mediciones se realizaron, con instrumental del Laboratorio de Termofluidos, Termopar digital, Marca Fluke, Modelo 52 K/J, con precisión de 0.01 %, datos. proporcionados por el fabricante.

## VARIABLES AUXILIARES EN LA MEDICION

**Flujo volumétrico de Gas L.P.-** es una medida tomada de la carátula del rotámetro, con esto es posible variar la relación, exceso de aire.

**Presión de Gas L.P. -** lectura medida con un manómetro, justo antes de la entrada de gas al quemador. En el quemador la entrada del gas debe ir con suficiente presión para que no haya necesidad de introducir aire primario, sino que con la del combustible, sea suficiente para arrastrar el aire primario proporcional al caudal del gas.

**Temperatura de los gases a la salida de la chimenea.-** ésta de alguna manera nos permite caracterizar los gases de combustión y se debe aclarar que la temperatura después de 2 horas con 30 minutos se mantuvo constante debido a que el sistema, alcanzó el sistema estacionario.

**Tiempo.-** que tarda en bajar el nivel de amoniaco en el depósito, para poder cuantificar el flujo volumétrico de reactante, inyectado a los gases de combustión.

**El aire de combustión.-** la importancia del aire reside en que es la fuente de oxígeno más abundante, barata y fácil de manejar. Sin embargo, al observar la composición del aire, se ve que por cada volumen de oxígeno aportado para la oxidación del combustible, se introducen en las condiciones teóricas 79 / 21 volúmenes de nitrógeno sin poder evitarlo. Es un elemento inerte y que actúa de forma negativa absorbiendo la mayor parte de la energía química liberada en la combustión.

Si de las condiciones teóricas se pasa a las reales, se observa que para conseguir una buena combustión, hay que introducir una cantidad mayor de aire para asegurar una buena mezcla entre el combustible y el oxígeno, la cuál permita una combustión completa y sin hidrocarburos no quemados.

En la realidad, se trabaja con una cantidad de aire superior a la mínima, para la buena mezcla de oxígeno / combustible, la cuál ha sido denominado previamente, exceso de aire.

El trabajar con exceso de aire trae como consecuencia:

- Disminución de la temperatura de flama

Como la transmisión de calor en el hogar se efectúa predominantemente por radiación, que es una función de la potencia cuarta de la temperatura, al disminuir la temperatura de flama como consecuencia del aumento del exceso de aire, disminuye el calor radiado en una proporción mucho más importante.

Al trabajar con mayores excesos de aire, aumenta la cantidad de calor que se va al exterior del horno con los gases de combustión.

Si precalentamos el aire que se introduce al sistema, se logrará lo siguiente:

Aumentar la temperatura de flama con lo que aumentará la cantidad de emisiones de NO<sub>x</sub>, usando el mismo combustible.

Al disminuir la temperatura de gases que se envía a la atmósfera, como consecuencia de haber precalentado el aire, se reducen las pérdidas por gases. Finalmente, puede sustituirse parte del aire de combustión por oxígeno comercial. Esta medida, la conocemos normalmente como aire enriquecido y está en la etapa de experimentación en laboratorio.

Si se utiliza una cantidad de aire menor que la mínima teórica, en los gases producto de la combustión aparecerán inquemados, que pueden ser de dos tipos: sólidos y gaseosos.

Los inquemados gaseosos son principalmente CO y H<sub>2</sub> y en algún caso, en proporciones muy reducidas, hidrocarburos ligeros. En cuanto a los inquemados sólidos, su composición es carbono no quemado, conocido comúnmente como: hollín, cenosféras, carbonilla y cenizas volátiles.

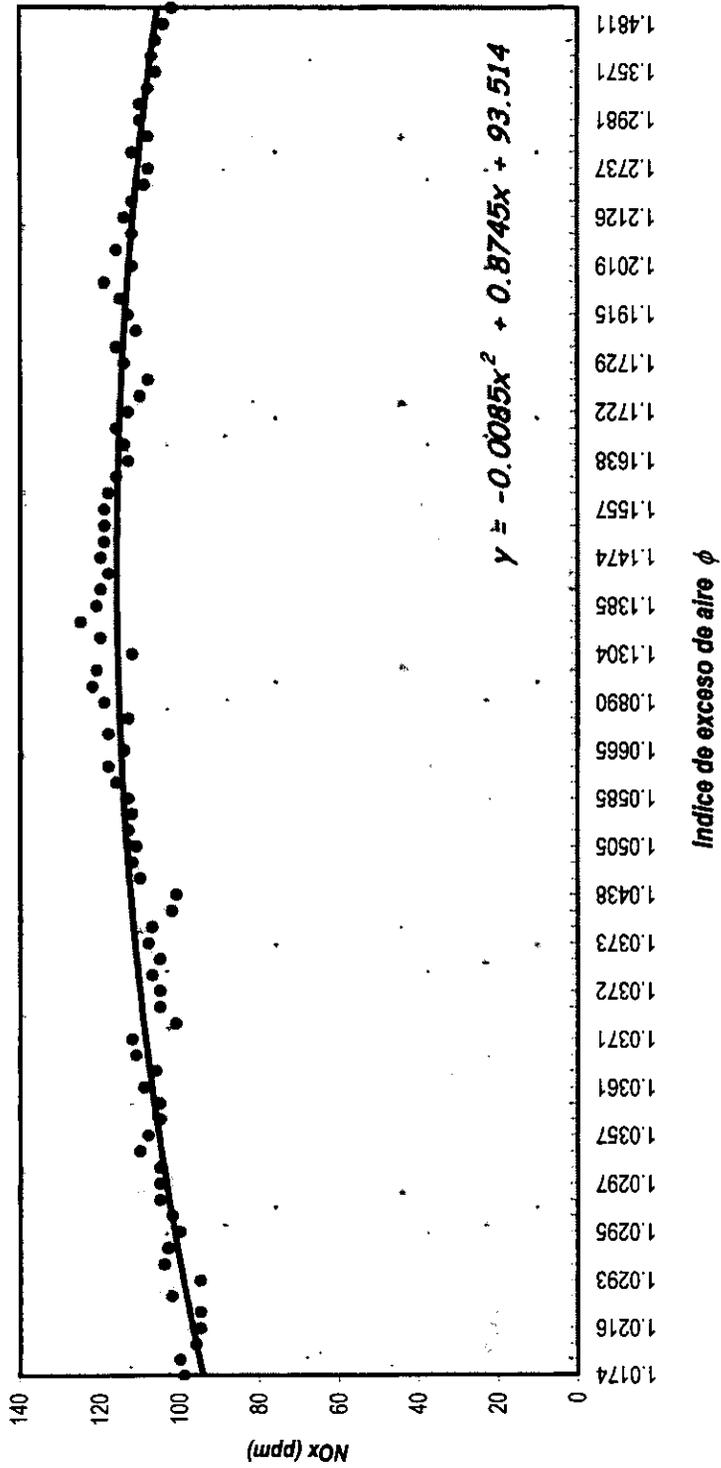
El efecto más importante en la aparición de inquemados, es una disminución del rendimiento de la combustión. La aparición de inquemados sólidos, tiene como consecuencia una disminución del volumen de gases fijos.

En cuanto a los inquemados gaseosos y dependiendo del exceso de aire con que se esté trabajando y de la cantidad de carbono que no es quemado a CO<sub>2</sub>, puede producir un aumento o disminución de volumen.

La gráfica 4.1, muestra cuál es el comportamiento de los óxidos de nitrógeno cuando se tienen diferentes relaciones estequiométricas o bien, diferentes excesos de aire, viéndose claramente que a menor cantidad de aire utilizado, menor la cantidad de óxidos de nitrógeno formado. Sin embargo, se muestra cuál es la zona donde se tiene una mayor formación de NO<sub>x</sub>. Aproximadamente se tiene la mayor formación al utilizar un 14 % de exceso de aire, para después disminuir estas emisiones al utilizar más aire, trayendo como consecuencia disminución en la temperatura de flama. Recordemos que los óxidos de nitrógeno se ven favorecidos con las altas temperaturas (NO<sub>x</sub> Térmico). De tal manera que esta gráfica muestra claramente cuál es el comportamiento de los NO<sub>x</sub>, cuando se tiene diferentes excesos de aire.

Para facilitar el análisis de la gráfica 4.1 se divide en dos partes, para  $\phi \leq 1.14$  y la otra a  $\phi > 1.14$ . Por una parte, se observa que la máxima producción de NO<sub>x</sub> no está en  $\phi = 1$  esto es debido a que en una mezcla estequiométrica no se logra una combustión completa, porque es prácticamente imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente, sobre todo teniendo en cuenta el corto lapso de tiempo en que la mezcla debe realizarse, aunado al desfazamiento de los tiempos de reacción (la velocidad de reacción de los óxidos de nitrógeno es más lenta que la de la combustión), esto obliga a emplear una cantidad real de aire mayor a la necesaria, es decir, que hay una combustión casi perfecta precisamente en el máximo de la gráfica ( $\phi=1.14$  y NO<sub>x</sub> = 125ppm) y no a condiciones estequiométricas. Al tener combustión casi perfecta la temperatura también tiene su máximo en este punto y favorece la producción de NO<sub>x</sub> térmico.

**Gráfica 4.1 Índice de exceso de aire vs NOx**



Por otro lado, cuando se tiene  $\phi < 1$  existe mezcla rica en combustible, por lo tanto se puede asegurar que no existe una combustión completa y en los gases de combustión se presentan inquemados, además de tener bajas temperaturas en la flama, debido a que existen pérdidas de calor por combustible que no reaccionó y en cambio sí se desechan a través de la chimenea del sistema, trayendo como consecuencia una baja emisión de NOx térmico. A medida que  $\phi$  aumenta, variando la cantidad de aire suministrado hacia el quemador hasta llegar al punto máximo ( $\phi=1.14$  y NOx = 125ppm), la cantidad de NOx térmico se va incrementado debido a que la temperatura en la flama va aumentando, esto como consecuencia de una disminución en la cantidad de combustible que no reacciona con el aire.

Para  $\phi > 1.14$  y NOx = 125 ppm la formación de NOx se ve desfavorecida ya que se aumenta la cantidad de aire suministrado a la flama, trayendo como consecuencia aumento en las pérdidas de calor que se van al exterior del horno con los gases de combustión, esto es, si se manejan mayores volúmenes de aire y gases la temperatura en la flama va decreciendo por el aumento del flujo volumétrico de los gases, disminuyendo el tiempo de residencia y por tanto los NOx. Además cabe aclarar que el aire utilizado en la mezcla se toma a condiciones ambientales de la Ciudad de México y la temperatura de este es mucho menor que la temperatura de la flama.

Cabe mencionar que la formación de NOx, se ve favorecida por lo que se observa de está gráfica mediante el mecanismo denominado NOx Térmico (Zeldovich) y el NOx instantáneo ya que el combustible utilizado es Gas L.P., el cual no contiene nitrógeno y en consecuencia que no haya NOx debido al combustible.

Por último no se debe olvidar que los gases a la salida de la chimenea están restringidos, esto con la intención de tener un tiempo de residencia mayor para tener una formación de NOx medible, así como una constante recirculación de gases en la chimena.

## **REDUCCION DE OXIDOS DE NITROGENO**

Una vez realizado el mapeo de temperaturas, se eligió el punto de inyección y debe ser tal que:

- La cantidad de amoniaco nebulizado que se inyecte no afecte la temperatura de la flama, al grado de enfriarla, y que traiga como consecuencia una disminución de los óxidos de nitrógeno.
- Con la inyección, no se apague la flama.
- Se garantice una mezcla casi perfecta de los gases de combustión con el reactante (amoniaco), para que no se provoquen escurrimientos.
- El tiempo en que reaccionen sea lo suficiente para que los NOx disminuyan y no aumenten.

Por lo tanto se eligió para inyectar el punto 3 del sistema de combustión, que se encuentra ubicado en el homo del sistema de combustión y se eligió, debido a:

Se tiene la temperatura para que los NO<sub>x</sub> reaccionen con el NH<sub>3</sub>, esto dentro del rango establecido en el capítulo 2. Según los trabajos previos a este (Leslie [4]). Además, el punto de inyección no se encuentra cerca de la flama, como para que ésta se apague o disminuya su temperatura.

Este punto se encuentra en la zona de postflama donde se forman los NO<sub>x</sub>.

- por otro lado, si es un punto más arriba, corremos el riesgo de que los gases de combustión y el NH<sub>3</sub> no cuenten con el tiempo suficiente para reaccionar y no exista una reducción de los NO<sub>x</sub>, formando una cantidad mayor en las emisiones de NO<sub>x</sub>.
- para esto, el Gas L.P. que se introduce al quemador, se mantuvo en  $7.86 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  (carátula del rotámetro) y a una presión de línea, antes de entrar al quemador de  $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ . El aire primario para la mezcla es arrastrado por el flujo de combustible hacia el quemador, como se describió antes.

Con estas condiciones se logra que la relación estequiométrica se mantuviera constante  $\phi = 1.14$  es decir, 14 % de exceso de aire y las emisiones de NO<sub>x</sub> se establecieron en 125 ppm.

Se eligió este punto ( $\phi \approx 1.14$ ) ya que es en éste donde las emisiones de NO<sub>x</sub> son las máximas y además el sistema alcanza el estado estacionario, después de un cierto tiempo de funcionamiento y calentamiento (2 horas 30 minutos); es decir, la temperatura en el sistema se mantuvo constante.

Una vez establecidos los parámetros a considerar; pasamos al ensayo de la reducción y ésta se hace, según los protocolos descritos en el capítulo anterior (capítulo 3).

En la tabla 4.3 se reportan más resultados obtenidos de la experimentación. En la primera columna, se tienen los NO<sub>x</sub>, que son tomados de lectura directa de la pantalla del Bacharach 300 NSx, en la segunda columna, se tabula la relación NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>, para esto recordemos que:

$$\frac{NH_3}{NO_x} = 1.5 \rightarrow 2 \quad (\text{Ver capítulo 2})$$

es decir, por cada ppm de NO<sub>x</sub> necesitamos  $\frac{1}{2}$  ppm de NH<sub>3</sub>.

$$\frac{NH_3}{2} = NO_x$$

ó

$$\frac{NH_3}{2} = 125 \text{ ppm de NO}_x$$

Por otro lado:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ ppm} &= 0.0001 \% \text{ mol} \\
 60 \text{ ppm} &= 0.006 \% \text{ mol} \\
 0.006 \% \text{ mol} &= 0.00006 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

entonces:

$$125 \text{ ppm de NOx} = 0.0125 \% \text{ mol} = 0.000125 \text{ m}^3 = .125 \text{ litros}$$

y

$$0.125 \text{ litros de NOx} = \frac{NH_3}{2}$$

por lo tanto, se necesitan:

$$NH_3 = 2(.125 \text{ litros de NOx})$$

Por otro lado, el depósito de amoníaco es un tubo de vidrio con las siguientes dimensiones:

Diámetro igual a 5 cm.

Entonces:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{y} \quad \text{volumen} = A \cdot L$$

donde:

$$D = 0.05 \text{ m}$$

entonces

$$A = \frac{\pi(0.05)^2}{4} = 1.9634 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = 1.9634 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 0.50 \text{ m} = 9.8174 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen} = 0.9817 \text{ Litros}$$

La longitud se toma del tubo de vidrio, esto permite calcular el volumen de amoníaco inyectado, utilizando la fórmula anterior.

El tiempo registrado, es el que tarda en bajar "L" (nivel de depósito), es decir, es el tiempo de reacción del amoníaco con los NOx.

La reducción se define como las emisiones de una especie en las condiciones de reacción NOx - amoníaco entre las emisiones de la misma especie a una condición específica, es decir:

$$Reduccion = \frac{[especie]_{Reduccion}}{[especie]_{Formacion}}$$

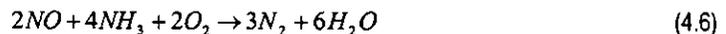
A partir de lo anterior, se puede definir:

- Reducción < 0 Si tenemos reacción de una parte de NOx con NH<sub>3</sub>
- Reducción = 0 Si no se tiene reacción de NOx con NH<sub>3</sub>
- Reducción > 0 Aumento de NOx

De la realización del experimento, en donde se tienen 125 ppm de NOx constantes, así como una relación estequiométrica constante, tomando en cuenta estas condiciones, se procedió solamente a variar la cantidad de amoniaco inyectado a los gases de combustión, para lograr con esto una reducción en las emisiones de NOx.

En la gráfica 4.2, se observa que existe una dependencia entre el amoniaco inyectado y la cantidad de emisiones de NOx reducidas, ya que al ir inyectando amoniaco se va observando una reducción en las emisiones, hasta llegar al valor máximo reducido de NOx (85 ppm); observándose una relación casi 2:1 NH<sub>3</sub> inyectado por cada unidad de NOx reducida, siendo éste el máximo valor reducido, ya que después de este punto y dependiendo de la cantidad de NH<sub>3</sub> inyectado se observa, casi inmediatamente un disparo en las emisiones, de tal manera que si se inyecta una gran cantidad de NH<sub>3</sub>, sin el debido cuidado y sin tomar en cuenta todas las medidas descritas, se obtendrá una mayor formación en las emisiones de NOx. Por lo tanto, se debe de tener cuidado con la cantidad de NH<sub>3</sub> inyectado, para garantizar una reducción eficiente.

Dando lugar a la reacción :



Después del valor aproximado de NH<sub>3</sub>/NOx = 2, se disparan las emisiones de NOx, de tal manera que los NOx se ven favorecidos en su formación cuando se inyectan grandes cantidades de amoniaco. Esto quiere decir, que para un valor mayor que éste, el amoniaco aparte de ya no reaccionar con los gases completamente, ocasiona un aumento en la formación de emisiones de NOx. Ahora se producen NOx, en vez de reducirlos.

A partir de aproximadamente un valor de NH<sub>3</sub> / NOx = 3, se percibe un fuerte olor a amoniaco, encontrándose en las paredes de la chimenea sales de amonio, debido a los escurrimientos de amoniaco existentes, al inyectar demasiado amoniaco. Por lo tanto, podemos afirmar que el amoniaco inyectado ya no reacciona completamente con los NOx, contenidos en los gases de combustión; la parte no reaccionante se va en los gases y en sales que se depositan en las paredes de la chimenea, a este fenómeno es lo que hemos venido nombrando, "escurrimientos de amoniaco", como ya se

parte no reaccionante se va en los gases y en sales que se depositan en las paredes de la chimenea, a este fenómeno es lo que hemos venido nombrando, "escurrimientos de amoniaco", como ya se mencionó, ocasionados por la cantidad de amoniaco inyectado que no ha reaccionado con las emisiones de NOx.

De esta manera, el sistema, redujo en un 32% las emisiones de óxidos de nitrógeno a la salida de la chimenea.



Figura 4.2 Vista interior del hogar (flama premezclada)

Para reducir el NOx térmico se usa reducción selectiva no catalítica, para este sistema hay NOx térmico y lo comprobamos al inyectar el amoniaco, ya que estos empiezan a disminuir de forma considerable en el intervalo de 0 a  $\approx 2.5$  en la fracción volumen  $\lambda = \text{NH}_3/\text{NO}_x$ , la disminución va de un rango de 125 ppm a 85 ppm y la reducción se debe a que el tiempo de residencia de los gases de combustión es suficiente para que reaccione con el amoniaco que se inyecta en el punto 3. Cabe aclarar que el amoniaco se nebuliza y además sufre un precalentamiento por las paredes del tubo que lo conduce; con esto se puede asegurar que la reducción se debe a la reacción de  $\text{NH}_3$  con los NOx para emitir agua y nitrógeno molecular, y no a que la flama baje su temperatura y se provoque menor producción de NOx. La reducción de las emisiones sólo es posible debido a que por cada mol de  $\text{NH}_3$  que se inyecta se reducen aproximadamente dos moles de NOx y se comprueba observando la región en donde se emiten 85 ppm de NOx; esto quiere decir que si inyectamos menos cantidad de  $\text{NH}_3$  la cantidad de NOx que reacciona es menor y por eso las emisiones no disminuyen de forma considerable de 0 a 1.5 de  $\lambda = \text{NH}_3/\text{NO}_x$ ; por otro lado se observa que el tiempo de reacción es suficiente ya que la cantidad de  $\text{NH}_3$  es menor a la cantidad de NOx que se pueden reducir, ahora la máxima reducción posible en nuestro sistema es de 32% y se debe a que el tiempo de residencia no es suficiente para que todo el amoniaco reaccione con los óxidos de nitrógeno, aunque en teoría la máxima reducción posible es entre 30 y 75%.

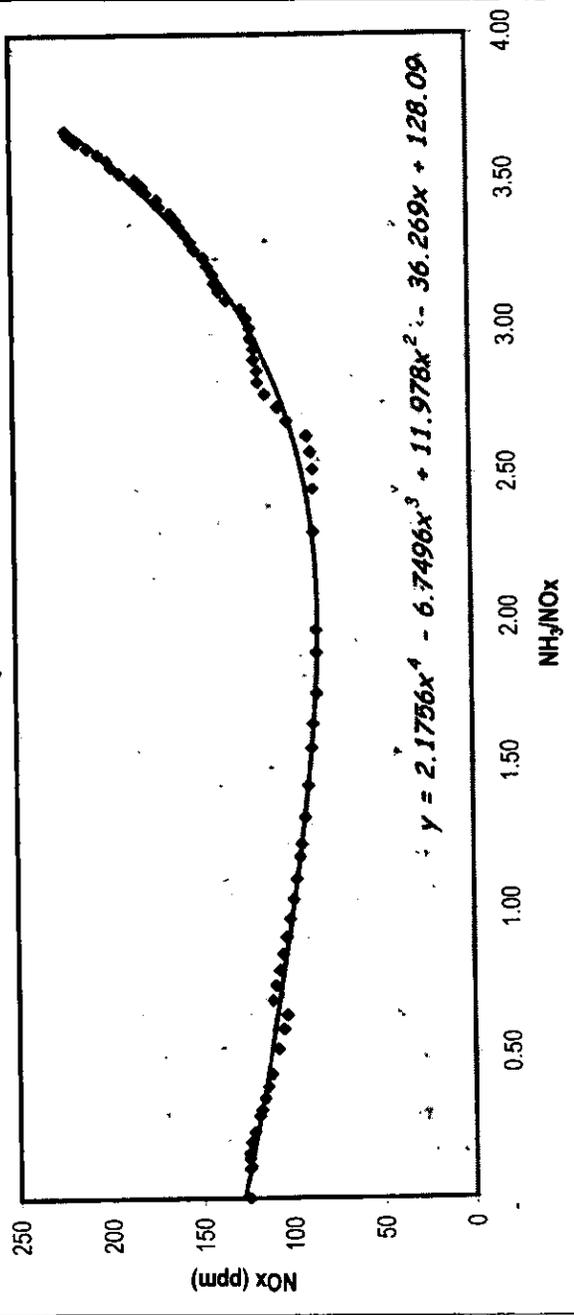
**TABLA 4.3 REDUCCION DE OXIDOS DE NITROGENO  
A RELACION ESTEQUIOMETRICA CONSTANTE**

<b>N<sub>0</sub>x (ppm)</b>	<b>NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub></b>	<b>NH<sub>3</sub> (ppm)</b>	<b>% Reducción</b>	<b>L (cm)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
125	-	-	-	-	-
125	0.10	13	0.0%	0.7	1.0
125	0.14	17	0.0%	0.9	1.3
125	0.16	20	0.0%	1.0	1.5
124	0.19	24	0.8%	1.2	1.8
122	0.23	28	2.4%	1.4	2.2
119	0.29	34	4.8%	1.7	2.6
118	0.31	36	5.6%	1.8	2.8
116	0.35	40	7.2%	2.0	3.1
114	0.39	44	8.8%	2.3	3.4
112	0.43	48	10.4%	2.4	3.7
108	0.52	56	13.6%	2.8	4.3
105	0.59	62	16.0%	3.1	4.7
103	0.63	65	17.6%	3.3	5.0
111	0.68	76	11.2%	3.9	5.9
109	0.74	80	12.8%	4.1	6.2
107	0.79	84	14.4%	4.3	6.5
105	0.85	89	16.0%	4.5	6.8
103	0.90	93	17.6%	4.7	7.2
101	0.97	98	19.2%	5.0	7.5
99	1.03	102	20.8%	5.2	7.9
97	1.11	107	22.4%	5.5	8.3
95	1.18	112	24.0%	5.7	8.7
94	1.23	115	24.8%	5.9	8.9
92	1.32	121	26.4%	6.2	9.3
90	1.42	128	28.0%	6.5	9.9
88	1.55	137	29.6%	7.0	10.5
87	1.63	142	30.4%	7.2	11.0
85	1.74	148	32.0%	7.5	11.4
85	1.88	160	32.0%	8.1	12.3
85	1.96	167	32.0%	8.5	12.9
86	2.30	198	31.2%	10.1	15.3
86	2.45	210	31.2%	10.7	16.2
86	2.52	216	31.2%	11.0	16.7
87	2.58	224	30.4%	11.4	17.3
89	2.63	234	28.8%	11.9	18.1

**TABLA 4.3 REDUCCION DE OXIDOS DE NITROGENO  
A RELACION ESTEQUIOMETRICA CONSTANTE**

<b>NOx (ppm)</b>	<b>NH3/NOx</b>	<b>NH<sub>3</sub> (ppm)</b>	<b>% Reducción</b>	<b>L (cm)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
100	2.68	268	20.0%	13.7	20.7
105	2.73	287	16.0%	14.6	22.1
112	2.77	311	10.4%	15.8	24.0
116	2.82	327	7.2%	16.6	25.2
116	2.86	331	7.2%	16.9	25.6
118	2.89	342	5.6%	17.4	26.4
118	2.93	346	5.6%	17.6	26.7
120	2.97	356	4.0%	18.1	27.5
120	3.00	360	4.0%	18.3	27.8
122	3.03	370	2.4%	18.8	28.6
125	3.06	383	0.0%	19.5	29.6
133	3.10	412	-6.4%	21.0	31.8
137	3.13	428	-9.6%	21.8	33.0
139	3.15	439	-11.2%	22.3	33.8
140	3.18	446	-12.0%	22.7	34.4
143	3.21	459	-14.4%	23.4	35.4
145	3.24	470	-16.0%	23.9	36.2
150	3.26	490	-20.0%	24.9	37.8
152	3.29	500	-21.6%	25.5	38.6
155	3.32	514	-24.0%	26.2	39.7
158	3.34	528	-26.4%	26.9	40.7
160	3.37	539	-28.0%	27.4	41.6
163	3.39	553	-30.4%	28.1	42.6
169	3.41	577	-35.2%	29.4	44.5
170	3.44	584	-36.0%	29.8	45.1
176	3.46	609	-40.8%	31.0	47.0
178	3.48	620	-42.4%	31.6	47.8
182	3.51	638	-45.6%	32.5	49.2
190	3.53	670	-52.0%	34.1	51.7
195	3.55	692	-56.0%	35.2	53.4
197	3.57	703	-57.6%	35.8	54.3
202	3.59	726	-61.6%	37.0	56.0
208	3.61	751	-66.4%	38.3	58.0
214	3.63	777	-71.2%	39.6	60.0
218	3.65	796	-74.4%	40.6	61.5
220	3.67	808	-76.0%	41.2	62.4

Gráfica 4.2 Reducción de Oxidos de Nitrógeno  
NH<sub>3</sub>/NOx



Para  $\lambda > 2$  ya no disminuyen si no por el contrario aumentan, debido que una parte de la cantidad de  $\text{NH}_3$  que no reacciona con los  $\text{NO}_x$  aporta una cantidad apreciable iones de nitrógeno atómico que reaccionan con los iones de oxígeno procedentes del exceso de aire que al reaccionar hace que aumenten los óxidos de nitrógeno, recordemos que la inyección de amoníaco se realizó para excesos de aire del 14 % ( $\phi = 1.14$ );

### **IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA DE INYECCION**

Al alejar el punto de inyección de la flama la temperatura disminuye. Los  $\text{NO}_x$  van en aumento a medida que la temperatura que se mide en la salida de los gases aumenta, esta alza en la temperatura es debido a que el tiempo de residencia de los gases en el sistema de combustión también lo hacen con lo cual se comprueba una vez más que la formación de los óxidos de nitrógeno solo se debe al  $\text{NO}_x$  térmico(mecanismo de Zeldovich) y no al mecanismo de  $\text{NO}_x$  instantáneo, aunque de esta observación se puede pensar que el hacer que los gases de combustión se mantengan menor tiempo dentro del sistema sea una alternativa para disminuir los óxidos de nitrógeno, pero no hay que olvidar que el tener un mayor tiempo de residencia de los gases puede ocasionar en un sistema, que no se trabaje a condiciones normales de operación, haciendo decaer la eficiencia del sistema (Ver tabla 4.2).

## CONCLUSIONES

Los óxidos de nitrógeno son formados durante la combustión como producto de la oxidación del nitrógeno atmosférico o en menor grado, a partir del nitrógeno orgánico contenido en el combustibles (según sea el caso). Esta formación en las emisiones es provocada además, mediante tres mecanismos de formación, que dan origen a los óxidos de nitrógeno, los mecanismos observados en el experimento fueron:

- NOx Térmico (mecanismo de Zeldovich), formándose principalmente cuando se tienen altas temperaturas, lo cual fue fácil de observar por lo analizado en las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3 que se desprendieron de las mediciones realizadas durante el experimento, siendo éste el mecanismo principal.
- NOx instantáneo, ocasionándose principalmente en el frente de flama de manera natural, para lo cual no hubo forma de evaluarlo por su escasa aportación.
- NOx por el combustible, de éste no se tuvo ningún indicio ya que se utilizó gas LP para la combustión y no contiene nitrógeno en su composición.

El usar flamas premezcladas en un proceso de combustión, trajo como consecuencia altas temperaturas, flamas cortas, así como una cantidad considerable de emisiones de NOx. Al contrario de cuando se usaron flamas difusivas, que son principalmente flamas más largas, con temperaturas más bajas y sin altas emisiones de NOx.

Una vez establecidas las condiciones más apropiadas para producir óxidos de nitrógeno, se paso a la caracterizaron de las emisiones y el sistema de combustión. Se eligió el método de **“Reducción selectiva no - catalítica”**, el cual es una técnica de control que ayuda a reducir las emisiones de NOx, formando N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O sin la presencia alguna de un catalizador, para un quemador de flama premezclada; utilizando la relación de que por cada 2 ppm de NOx se necesita 1 ppm de NH<sub>3</sub>.

En suma, los óxidos de nitrógeno pueden de ser reducidos con solo inyectar amoniaco; en este trabajo solo se pudo reducir un 30 % debido a que se deben restringir más los siguientes parámetros:

- Tiempo de residencia de los gases
- Velocidad de los gases
- Velocidad de inyección
- Tamaño de las gotas de amoniaco nebulizado
- Excesos de aire

De esto concluimos que la relación  $\lambda = \text{NH}_3/\text{NO}_x$  varía un poco con respecto a resultados anteriores y en este caso la máxima reducción se tuvo en un rango más amplio (1.5 a 2.5), además de que solo se redujeron en un 32% las emisiones, además de que la temperatura es una de las principales variables

que deben de ser cuidadas, para controlar la reacción que formará a los NOx en N<sub>2</sub>, siendo este rango de 1,200 - 1,500 K, básicamente. La reacción tardía causará un incremento en la producción de NOx o cuando el amoníaco es inyectado en zonas de bajas temperaturas, se tiene una pérdida de eficiencia en el proceso, dando lugar a la formación de óxidos de nitrógeno, ocasionando el cambio en la reducción, por la formación de las emisiones.

La selección de la inyección óptima del NH<sub>3</sub> en lugares estratégicos, favorece al rendimiento en la reducción de NOx teniendo casi nulos escurrimientos de amoníaco.

Por otro lado el quemar gas LP con excesos de aire puede traer consecuencias no deseables para la reducción de los óxidos de nitrógeno ya que las probabilidades de reacción entre el oxígeno excedente que proviene del exceso de aire y el nitrógeno que proviene del NH<sub>3</sub> provocan el aumento de los NOx en  $\lambda > 2.5$  y con esto comprobamos que la eficiencia del sistema se vio disminuido debido que al inyectar amoníaco, una parte reaccionaba con los óxidos de nitrógeno y estos se reducían, por otra parte, el NH<sub>3</sub> reaccionaba con el oxígeno del aire proveniente del exceso del mismo, formándose más emisiones de NOx por eso la eficiencia del sistema en lugar del 70% resulto del 32%.

Esto hace pensar que si disminuidos aún más el exceso de aire, hasta tener una mezcla rica en combustible, oxígeno en exceso que pueda reaccionar con el amoníaco se podrán disminuir mucho más los óxidos de nitrógeno pero esto no es posible ya que se baja la temperatura en la flama y esto no es precisamente lo que se desea. Lo ideal es trabajar con excesos de aire limite que garanticen una eficiencia de combustión que permita a los equipos trabajar en zonas óptimas de carga. Para el caso en particular, que se maneja en este proyecto se debe bajar el exceso de aire sin bajar la temperatura del rango establecido (1,200 a 1,500 K) que permita una reacción óptima entre gases de combustión y amoníaco además de una buena producción de NOx.

Como una siguiente etapa, sería importante hacer un análisis comparativo en cuanto a costos de instalación, equipo, mantenimiento y rentabilidad, comparado con los demás sistemas existentes. Además, de poder hacer una simulación, para saber que es lo que pasa dentro del horno, conociendo, como se da lugar a las reacciones existentes, para que se lleve a cabo la reducción de contaminantes.

Por último el sistema de Reducción Selectiva no Catalítica es tan solo un método alternativo para la reducción de NOx que es el que más se acopla a las necesidades del proyecto pero no necesariamente cubrirá las necesidades de todos los sistemas de combustión que tengan como problema la reducción de NOx.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Caselli Maurizio, "La contaminación atmosférica", Primera edición en español, siglo XXI Editores, México, 1992.
- [2] Stephen C. Wood, "Select the Right NOx Control Technology", Chemical Engineering Progress, Energy Technology Consultants, Inc. January 1994
- [3] Van Velzen Daniel,, "Chemical and environmentt science", Vol. 3 Sulphur dioxide an nitrogen oxides in industrial waste gases emission, legislation and abatement.
- [4] Lesli L. Sloss, et al, "Nitrogen Oxides Control Technology", Noyes Data Corporation.
- [5] Institute of clean air companies, "Selective non - catalytic reduction (SNCR) for controlling NOx emissions", Washington, D.C. USA, july, 1994.

### ***Libros complementarios***

- [6] Salvi Giuliano, "La combustión, Teoría y Aplicaciones" Versión española de la segunda edición Italiana, Editorial Dossat, S.A., Madrid
- [7] Singer J.G., "Combustion Fossil Power Systems", Combustion engineering inc. Third Edition, 1981.
- [8] Martínez Márquez Manuel, "Combustión y Quemadores", Morcombo Boixareu Editores, Barcelona España, 1989.
- [9] Burke, T.F. Schumann, Ind. Engineering Chemical 20-998, 1928.
- [10] Lacy Rodolfo, "La contaminación del aire en el Valle de México", Centro de Estudios Demográficos y de Desarrollo Urbano, Colegio de México, México, 1980.
- [11] Rossy, "Environmental Engineering"
- [12] Strauss, S.J. Mainwaring, "Contaminación del aire, causas, efectos y soluciones", Departamento de Ciencias Industriales, Universidad de Melbourne, Editorial Trillas, México, 1990.
- [13] Organización Mundial de la Salud, "Criterios de Salud Ambiental 4, Oxidos de Nitrógeno", Publicado bajo el patrocinio conjunto del programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y la Organización Mundial de la Salud, Publicación Científica No. 389

- [14] Robbins Robinson, "Emissions Concentration and fate of gaseosos", Control Porte II, New York, Wiley Inters-cience
- [15] Spedding D.J., "Contaminación Atmosférica", Editorial Reverté, España, 1981.
- [16] Mackinnon, D.J. "Nitric oxide formation at high temperatures", J. Air Pollut Control Assoc. 24(3): 237-239, 1974.
- [17] Leighton P.A. "Photochemistry of air Pollution", Academic Press, New York, 1961.
- [18] Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), "Estadísticas e Indicadores Económicos Energéticos de América Latina y del Caribe", Quito Ecuador, Junio 1996.
- [19] Restrepo Ivan, "La contaminación atmosférica en México, sus causas y sus efectos en la salud", Comisión Nacional de Derechos Humanos, México, D.F., 1992.
- [20] Wark Kenneth, "Termodinámica", Primera Edición en México, Mc-Graw - Hill, Traducido de la Quinta Edición en Inglés, México, 1990.
- [21] Manuales técnicos y de instrucción para conservación de energía, "Combustibles y su combustión", Centro de estudios de la energía, Madrid España, 1992.
- [22] Zeldovich, J. "The oxidation of Nitrogen in combustion and Explosion", Acta physiod, USSR, Moscow 21 (4), 1946.
- [23] Peters N, Rogg, B. "Lecture notes in physics", m/5, Ediciones Springer Verlag, 1993.
- [24] Miller, J. A., Branch, M.C., McLean, W.J., Chandler, D.W. Smooke, M.D. and Kee, R.J. 20<sup>th</sup> Symposium [Int] combustion, 673 - 684 pp. The combustion.
- [25] Drake, M.C. and Blint, R.J. Combustion and flame 83 pp, 185 - 203, 1991
- [26] Blauwens, J. Smets, B an Peters, 16<sup>th</sup> Symposium (Int) Combustion, pp 1055 - 1064, the combustion institute, Pittsburgh 1997.
- [27] Sanders, W.A. "Combustion science and technology" 51, 103. 1987
- [28] Berman, M. R. and Lin, M.C.J. "Physics and chemical", 87, 3933 (1983).
- [29] White, A.R. and Phillips, L.F., "Chemical and physics" Lett, 98, 590, (1983).
- [30] Axwhorthy, A.E. and Dayan, V.H. "Combustion Symposium", September 1977.

- [31] Haynes, B.S. "Combustion and Flame", 28, 113 (1977).
- [32] Morley, C. "Combustion and Flame", 27, 189 (1976).
- [33] Morley, C. 18<sup>th</sup> Symposium (Int) Combustion, pp 23 - 32, The combustion Institute, Pittsburgh (1981).
- [34] Fenimore, C.P. 17<sup>th</sup> Symposium (Int) Combustion, pp. 919 -927, The combustion institute, Pittsburgh (1981)
- [35] Perry, R.A. and Melius, C.F. 20<sup>th</sup> Symposium (Int) combustion, pp. 639 - 646, The combustion Institute, Pittsburgh
- [36] Meyerson, A.L. Taylor, F.R., 6<sup>th</sup> Symposium International Combustion, pp. 154 - 163, Reinhold, N.Y. (1957)
- [37] Wendt, J.O.L. Sterling, C.V. and Matovich, M.A. 14<sup>th</sup> Symposium (International) Combustion, pp. 53-63, The combustion Institute, Pittsburgh (1981).
- [38] Department of health, education, and welfare, "Control techniques for nitrogen oxides from stationary sources", Public health service, Environmental health service, National air pollution control administration, Washington, D.C., March 1970.
- [39] Diario Oficial, "Norma Oficial Mexicana NOM-069-SCFI-1994 Instalaciones domesticas e industriales de Gas L.P.", SECOFI, 1994.
- [40] Javier Rodríguez Izquierdo, "El Gas L.P. y sus propiedades más importantes", Metálicos Armebe, S.A. de C.V., Tlalnepanla, Edo. de México, 1996.
- [41] Manuales técnicos y de instrucción para conservación de energía, "Generación de vapor", Centro de estudios de la energía, Madrid España, 1992.
- [42] Manuales técnicos y de instrucción para conservación de energía, "Hornos industriales", Industria y transporte, Centro de estudios de la energía, Madrid España, 1992.
- [43] Michael A. Boles, "Termodinámica", Primera edición en México, Translated of the second edition, McGraw Hill, 1996

**Review**

- [44] Carlos E. Romero, "Sensitivity of the SNCR process to furnace process variables", Energy research center, Lehigh University, Pittsburgh, USA. May, 1997.

- [45] Pavinski, C. Romero, E. Levy, "An approach to boiler sootblowing for optimizing NO<sub>x</sub> and heat rate", Energy Research Center, Lehigh University, Bethlehem Pa. USA, 1996.
- [46] Victor Ciarlante, P. E., "Design and characterization of a urea - based SNCR system for a utility boiler", Research Cottrell, Branchburg, NJ. USA, August 1997.
- [47] James E. Staudt, Robert P. Casill, "Comercial application of Urea SNCR for NO<sub>x</sub> ract compliance on a 112 Mwe pulverized coal boiler", Research Cottrell, Kansas City, USA. May 1995.
- [48] James E. Staudt, "Cost - effective methods for NO<sub>x</sub> compliance through selective non - catalytic reduction (SNCR) and combinations of SNCR with other technologies", Research Cottrell, Competitive power congress, Philadelphia, Pa. USA. June 1994.
- [49] Nicholas Confuorto, "NO<sub>x</sub> reduction using the NO<sub>x</sub>OUT process in an industrial boiler burning fiberfuel and other fuel", New Jersey, USA. 1993.
- [50] Victor Ciarlante, P. E., "Application of urea SNCR on a T - fired 84 Mwe PC boiler", Research Cottrell, Presented at the first annual DOE conference on selective catalytuc and non - catalytic reduction for NO<sub>x</sub> control, Pittsburgh, Pa, USA, May 1997.
- [51] Mary Beth Foisy, "NO<sub>x</sub> emission reduction strategies", White plains, NY, USA, May 1997.
- [52] W. Pershing and P.J. Smith, "A model for prediction of selective non - catalytic reduction of nitrogen oxides by ammonia, urea, and cyanuric acid with mixing limitations in the presence of CO", University of Utah, SNCR paper for 26<sup>th</sup> Symposium, USA, May 1997.
- [53] Wheelabrator, Air pollution control, "NO<sub>x</sub> control selective non - catalytic reduction", for control of NO<sub>x</sub> emisiones from stationary sources, USA, February 1997.
- [54] James E. Staudt, "A review of NO<sub>x</sub> control technologies for stationary sources", Research Cottrell, Air pollution control division, Branchburg, NJ, USA, May 1993.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## **APENDICE A**

Normas Oficiales Mexicanas para fuentes fijas y fuentes móviles.

### **Fuentes fijas**

#### **NOM-039-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido y trióxido de azufre y neblinas de ácido sulfúrico, en plantas productoras de ácido sulfúrico.

#### **NOM-040-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas, así como los requisitos de control de emisiones fugitivas, provenientes de las fuentes fijas dedicadas a la fabricación de cemento.

#### **NOM-043-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.

#### **NOM-046-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de bióxido de azufre, neblinas de trióxido de azufre y ácido sulfúrico, provenientes de procesos de producción de ácido dodecibencensulfónico en fuentes fijas.

#### **NOM-051-ECOL-1993**

Que establece el nivel máximo permisible en peso de azufre, en el combustible líquido gasóleo industrial que se consume por las fuentes fijas en la zona metropolitana de la ciudad de México.

#### **NOM-075-ECOL-1995**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de compuestos orgánicos volátiles provenientes del proceso de los separadores agua - aceite de las refinerías de petróleo.

#### **NOM-085-ECOL-1994**

Contaminación atmosférica - fuentes fijas - para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por

combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

#### **NOM-086-ECOL-1994**

Contaminación atmosférica - especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.

#### **NOM-092-ECOL-1995**

Que regula la contaminación atmosférica y establece los requisitos, especificaciones y parámetros para la instalación de sistemas de recuperación de vapores de gasolina de estaciones de servicio y de autoconsumo ubicadas en el valle de México.

#### **NOM-093-ECOL-1995**

Que establece el método de prueba para determinar la eficiencia de laboratorio de los sistemas de recuperación de vapores de gasolina en estaciones de servicio y de autoconsumo.

#### **NOM-097-ECOL-1995**

Que establece los límites máximos permisibles de emisión a la atmósfera de material particulado y óxidos de nitrógeno en los procesos de fabricación de vidrio en el país (1a. aclaración 01-julio-1996. y 2a. aclaración 16-octubre-1996).

### ***Fuentes móviles***

#### **NOM-041-ECOL-1996**

que establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina como combustible.

#### **NOM-042-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape de vehículos automotores nuevos en planta, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo (gas L.P.), gas natural y otros combustibles alternos, con peso bruto vehicular de 400 a 3,857 kilogramos.

**NOM-044-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos.

**NOM-045-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

**NOM-047-ECOL-1993**

Que establece las características del equipo y el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de contaminantes, provenientes de los vehículos automotores en circulación que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos.

**NOM-048-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono y humo, provenientes del escape de las motocicletas en circulación que utilizan gasolina o mezcla de gasolina -aceite como combustible.

**NOM-049-ECOL-1993**

Que establece las características del equipo y el procedimiento de medición, para la verificación de los niveles de emisión de gases contaminantes, provenientes de las motocicletas en circulación que usan gasolina o mezcla de gasolina - aceite como combustible.

**NOM-050-ECOL-1993**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes provenientes del escape de los vehículos automotores en circulación que usan gas licuado de petróleo, gas natural u otros combustibles alternos como combustible.

**NOM-076-ECOL-1995**

Que establece los niveles máximos permisibles de emisión de hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno provenientes del escape, así como de hidrocarburos evaporativos provenientes del sistema de combustible que usan gasolina, gas licuado de petróleo, gas natural y

otros combustibles alternos y que se utilizaran para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos nuevos en planta.

**NOM-077-ECOL-1995**

Que establece el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

Fuente: INE, 1997. Normas Oficiales Mexicanas, Dirección General de Regulación Ambiental.

Sistema Nacional de Información Ambiental

## APENDICE B

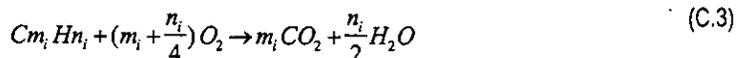
A continuación se enlista el programa utilizado, para la obtención de excesos de aire, relación estequiométrica, así como, la cantidad de combustible utilizado en cada medición.

```
CLS
Print "Facultad de Ingeniería"
Print "Laboratorio de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental"
Print "Programa que obtiene: Exceso de aire, relación estequiométrica y % molar de combustible"
Print "Escribe la composición del combustible utilizado (Gas. L.P.)"
Print
Print
Input "Carbono contenido en el combustible"; C
Input "Hidrógeno contenido en el combustible"; H
Do
    CLS
    Input "Escribe el valor del % O2, obtenido en la medición"; O2
    Input "Escribe el valor del % CO, obtenido en la medición"; CO
    Input "Escribe el valor del % CO2, obtenido en la medición"; CO2
    N2 = 100 - (O2 + CO + CO2)
    Print "El valor del N2 en % es.:"; N2
    Print
    Print
    Print "La ecuación de combustión, para estas características es:"
    A = N2 / 3.76
    'B = 2 * A - (CO + 2 * CO2 + 2 * O2)
    X = (CO + CO2) / C
    B = (8.9992 * X) / 2
    Print
    Print X; SPC(.5); "C"; C; SPC(1); "H"; H; SPC(.2); "+"; A; "(O2 + 3.76N2)"; SPC(.5); "→"; CO;
    Print "CO"; SPC(.5); "+"; SPC(.2); CO2; "CO2"; SPC(.5); "+"; SPC(.2); O2; "O2"; SPC(.5); "+";
    Print SPC(.2); B; "H2O"; SPC(.5); "+"; SPC(.2); N2; "N2"
    CA = 12.01115
    HI = 1.00797
    Print
    Print "El exceso de aire contenido en la combustión es:"
    EA = (A / X) * 100 / 5.7966
    EA1 = EA - 100
    Print EA1
    Print "La relación aire combustible es:"
    AC = ((A / X) * 4.76 * 28.97) / (CA * C + HI * H)
    Print ; AC
    Print "La relación estequiométrica es:"
    OI = AC / 15.4693803181#
    Print ; OI
    Input "Quieres hacer otro cálculo (Y/N)", Z$
    If Z$ = "N" then exit do
Loop
END
```

## APENDICE C

### REACCIONES Y AIRE ESTEQUIOMÉTRICO NECESARIO PARA COMBUSTIBLES GASEOSOS

Como en un combustible gaseoso la composición viene dada en función de los distintos gases constituyentes y no como composición elemental, las reacciones de combustión se pueden expresar de la siguiente manera:



Esta última reacción corresponde a un hidrocarburo gaseoso genérico. En el caso del combustible utilizado (Gas LP), el cual tiene la siguiente composición\*:

Tabla C.1 Composición del combustible utilizado, Gas L.P.

<b>Componentes</b>	<b>% Mol</b>	<b>C (m)</b>	<b>H (n)</b>	<b>% C</b>	<b>% H</b>
Metano	0.01	1	4	0.0001	0.0004
Etano	0.57	2	6	0.0114	0.0342
Propano	45.59	3	8	1.3677	3.6472
Propileno	0.58	3	6	0.0174	0.0348
iso butano	14.56	4	10	0.5824	1.456
n butano	32.63	4	10	1.3052	3.263
Buteno 1	1.16	4	8	0.0464	0.0928
iso butileno	0.72	4	8	0.0288	0.0576
trans buteno	1.33	4	8	0.0532	0.1064
iso pentano	1.38	5	12	0.069	0.1656
cis buteno	0.87	4	8	0.0348	0.0696
n pentano	0.44	5	12	0.022	0.0528
1-3 butadieno	0.03	4	6	0.0012	0.0018
Pentano 1	0.02	5	12	0.001	0.0024
metil butano	0.01	4	10	0.0004	0.001
metil pentano	0.02	5	12	0.001	0.0024
Hexano	0.08	6	14	0.005	0.0111

\* El análisis se realizó en el Instituto Mexicano del Petróleo, por medio de un cromatógrafo de gases.

Para la composición promedio de este combustible, la estequiometría sería:



En donde:

$$m_i = 3.5468 \text{ y } n_i = 8.9992$$

Por consiguiente, el volumen de aire (VA) necesario y suficiente para asegurar la combustión completa de la unidad de combustible y se expresa en  $m^3_a / kg_c$  para combustibles sólidos o líquidos y  $m^3_a / m^3_c$  para combustibles gaseosos. Este volumen de aire teórico, es la cantidad teórica mínima necesaria para la realización de la combustión.

$$VA = \frac{VB \cdot 100}{21} \quad (C.5)$$

Donde VB representan los moles de oxígeno necesarios para la combustión, dependiendo de los elementos que constituyen al combustible.

$$VB = \left[ \frac{H}{2} + \frac{C}{2} \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) M - b \right] \frac{1}{100} \quad (C.6)$$

Sea un combustible gaseoso dado, cuya composición se componga de los siguientes elementos:

- H = Porcentaje de H<sub>2</sub>, contenido en el combustible
- C = Porcentaje de CO, contenido en el combustible
- M = Porcentaje de CmHn, contenido en el combustible
- E = Porcentaje de H<sub>2</sub>O, contenido en el combustible no incluido en esta ecuación.
- a = Porcentaje de N<sub>2</sub>, contenido en el combustible
- b = Porcentaje de O<sub>2</sub>, contenido en el combustible
- k = Porcentaje de CO<sub>2</sub>, contenido en el combustible

De tal manera, que para el combustible utilizado (GLP), sustituyendo los correspondientes valores en las expresiones anteriores, se obtienen los siguientes datos:

$$VB = \left[ \left( 3.5468 + \frac{8.9992}{4} \right) 100 \right] \frac{1}{100} = 5.7966 \frac{m^3 O_2}{m^3 \text{ Combustible}} \quad (C.7)$$

$$VA = \frac{100 \times VB}{21} = \frac{100 (5.7966)}{21} = 27.6028 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ Combustible}} \quad (C.8)$$

Por lo tanto el volumen de aire estequiométrico, será la cantidad teórica mínima necesaria para la realización de la combustión.

$$VA = 27.6028 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ Combustible}} \quad (C.9)$$

Este volumen de aire, estará referido a condiciones normales (0°C y 1 atm.).

## CANTIDAD Y COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Para poder determinar la composición de los productos de la combustión, será necesario definir, el poder fumígeno húmedo, el cual será el volumen de humos húmedos desprendidos por la combustión y estará dado mediante la siguiente expresión:

$$VFH = VF + VH_2O \quad (C.10)$$

Donde, el poder fumígeno (VF), se conocerá como el volumen de humos secos, desprendido por la combustión neutra de la unidad de cantidad de combustible. Este volumen se supone a 0°C bajo la presión atmosférica normal y el agua que se forma, se supone condensada (humo seco). Este humo no solo contiene los productos de la combustión sino también el nitrógeno del aire comburente:

$$VF = \frac{1}{100} \left[ C + \sum mM + a + k \right] + \frac{79 \cdot VB}{21} \quad (C.11)$$

Además  $VH_2O$ , será el volumen de vapor de agua producida en la combustión y estará dada por la expresión:

$$VH_2O = \left[ H + \sum \left( \frac{n}{2} \right) M + E \right] \frac{1}{100} \quad (C.12)$$

De tal manera que, para el combustible utilizado, sustituyendo los correspondientes valores en las expresiones anteriores, se obtienen los siguientes datos:

$$VF = \left[ 3.5468(100) \right] \frac{1}{100} + \frac{79(5.7966)}{21} = 25.3530 \frac{m^3 \text{ humos secos}}{m^3 \text{ Combustible}} \quad (C.13)$$

$$VH_2O = \left[ \frac{8.9992}{2} \right] 100 \times \frac{1}{100} = 4.4996 \frac{m^3 H_2O}{m^3 \text{ combustible}} \quad (C.14)$$

La cantidad de humos húmedos a la salida será:

$$VFH = 29.8526 \frac{m^3 \text{ humos húmedos}}{m^3 \text{ combustible}} \quad (C.15)$$

Para la determinación de los productos de la combustión, en la combustión estequiométrica será:

$$CO_2 = \frac{VCO_2}{VFH} \times 100 \quad (C.16)$$

Donde  $VCO_2$ , esta dado por la expresión:

$$VCO_2 = \left[ C + \sum (m)M + k \right] \frac{1}{100} \quad (C.17)$$

Sustituyendo:

$$VCO_2 = \left[ 3.5468 \times 100 \right] \frac{1}{100} = 3.5468 \frac{m^3 CO_2}{m^3 combustible} \quad (C.18)$$

El porcentaje de  $CO_2$  a la salida será:

$$CO_2 = \frac{3.5468}{29.8526} \times 100 = 11.88\% \quad (C.19)$$

El porcentaje de vapor de agua, estará dado por:

$$H_2O = \frac{VH_2O}{VFH} \times 100 \quad (C.20)$$

Sustituyendo:

$$H_2O = \frac{4.4996}{29.8526} \times 100 = 15.07\% \quad (C.21)$$

mientras que para el nitrógeno, estará dado por:

$$N_2 = 100 - (CO_2 + H_2O) \circ \frac{79 \times VB}{21 \times VFH} \quad (C.22)$$

de tal manera, que al sustituir los valores, se encuentra:

$$N_2 = 100 - (11.88 + 15.07) \circ \frac{79 \times 5.7966}{21 \times 29.8526} = 73.05\% \quad (C.23)$$

Todo este desarrollo, se realizo para la combustión estequiométrica.

Para el caso, en que se tuviera un valor de exceso de aire ( $n$ ), se agregaría el porcentaje de  $O_2$  y cambiaría el valor de  $N_2$  a la salida, mediante las expresiones:

$$N_2 = \frac{79 \times n \times VB}{21 \times VFH} \times 100 \quad (C.24)$$

mientras que para el oxígeno:

$$O_2 = \frac{VB(n-1)}{VFH} \times 100 \quad (C.25)$$

Los productos de la combustión en base seca, se obtendrían, utilizando el poder fumígeno, es decir:

$$CO_2 = \frac{VCO_2}{VF} \times 100 \quad (C.26)$$

Sustituyendo encontramos, el porcentaje de CO<sub>2</sub> máximo referido a humos secos.:

$$CO_2 = \frac{3.5468}{25.3530} \times 100 = 13.98\% \quad (C.27)$$

mientras que para el N<sub>2</sub> se tendrá:

$$N_2 = 100 - (CO_2 + ) \text{ o } \frac{79 \times VB}{21 \times VF} \quad (C.28)$$

Sustituyendo, obtenemos:

$$N_2 = 100 - (13.98) \text{ o } \frac{79 \times 5.7966}{21 \times 25.3530} = 86.02\% \quad (C.29)$$

## APENDICE D

### OBTENCION DE LOS PARAMETROS PARA EL DIAGRAMA DE OSTWALD

Para la obtención de el diagrama, se utilizan los siguiente parámetros:

Para un combustible dado (Gas L.P.);  $C_{3.5468} H_{8.9992}$ , hacemos:

donde:

- H = Porcentaje de  $H_2$ , contenido en el combustible
- C = Porcentaje de CO, contenido en el combustible
- M = Porcentaje de  $C_mH_n$ , contenido en el combustible
- E = Porcentaje de  $H_2O$ , contenido en el combustible
- a = Porcentaje de  $N_2$ , contenido en el combustible
- b = Porcentaje de  $O_2$ , contenido en el combustible
- k = Porcentaje de  $CO_2$ , contenido en el combustible

$$V_B = \left[ \frac{H}{2} + \frac{C}{2} + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) M - b \right] \frac{1}{100}$$

Sustituyendo valores:

$$V_B = \left[ \left( 3.5468 + \frac{8.9992}{4} \right) 100 \right] \frac{1}{100} = 5.7966 \frac{Nm^3 O_2}{Nm^3 Combustible}$$

$$V_A = \frac{100 V_B}{21} = \frac{100(5.7966)}{21} = 27.6028 \frac{Nm^3 aire}{Nm^3 combustible}$$

$$V_F \left[ C + \sum m M + a + K \right] \frac{1}{100} + 79 \frac{V_B}{21}$$

$$V_F = 3.5468(100) \frac{1}{100} + 79 \frac{5.7966}{21} = 25.3530 \frac{Nm^3 humos humedos}{Nm^3 combustible}$$

$$A' = \frac{21 V_A}{V_F} = \frac{21(27.6028)}{25.3530} = 22.8635$$

$$\alpha_0 = \frac{V_{CO_2}(100)}{V_F} = \frac{3.5468(100)}{25.3530} = 13.9897$$

$$V_{CO_2} = \frac{1}{100} (CO + \sum m M + CO_2) = \frac{3.5468}{100}$$

$$\alpha = \alpha_0 - \left(\frac{\alpha_0}{100} + 2\right) \omega; \text{ Si } \alpha = 0 \Rightarrow \omega = \frac{\alpha_0}{\frac{\alpha_0}{100} + 2} = \frac{13.9896}{\frac{13.9896}{100} + 2} = 6.5375$$

$$\beta_{max} = \frac{\alpha_0}{1 - \frac{79 \alpha_0}{4200}} = \frac{13.9896}{1 - \frac{79(13.9896)}{4200}} = 18.9855$$

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{\omega}{21} \alpha_0 = 13.98 - \frac{6.5375}{21} (13.9896) = 9.6345$$

Con estos parámetros, se obtiene el diagrama de Ostwald para el combustible dado (Gas L.P.).



Medicina No. 57  
Copilco Universidad

**Tels.**

659 2934 659 8761

**Fax.**

658 7152