

FACTORES QUE DETERMINAN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES GASEOSOS Y PARTICULADOS POR LA COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Edgar Bobadilla Alfaro
Elías Gómez Macías
Beatriz Irene Ramírez Botero*

RESUMEN

Se analiza el efecto de factores fisicoquímicos, cinéticos, estequiométricos y de las condiciones de mezcla sobre las emisiones de cinco principales clases de contaminantes producidos por los equipos de combustión.

Las emisiones de monóxido de carbono (CO) son gobernadas por la temperatura y la proporción aire a combustible.

La producción de óxidos de nitrógeno (NOx) está determinada por condiciones de operación (principalmente temperatura) y la composición del combustible.

Los óxidos de azufre (SOx) son altamente influenciados por la temperatura; en general es más rápida la formación de SO₂ que su oxidación a SO₃.

La temperatura y el grado de homogeneización de la mezcla son determinantes en la formación de compuestos orgánicos volátiles ("VOC").

La emisión de hollín y cenizas finas depende básicamente de la temperatura, relación aire-combustible y condiciones de homogeneización de la mezcla.

INTRODUCCIÓN

El gran auge que ha tomado el cuidado del ambiente en todas sus formas y las reglamentaciones elaboradas al respecto, obligan a que parte de las investigaciones que se realizan con este fin se dirijan a las emisiones gaseosas producidas por máquinas de combustión.

Para obtener un conocimiento satisfactorio y su debido control es necesario profundizar sobre la química de dichas emisiones y los factores que las determinan (estequiometría, temperatura, presión, formación de otros productos, etc.).

Este trabajo presenta una revisión exhaustiva de la información disponible para el conocimiento de las emisiones gaseosas y su forma de control, extractando de todo este material lo más importante en el comportamiento químico y las alternativas para disminuir estos contaminantes.

FACTORES QUE DETERMINAN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES GASEOSOS Y PARTICULADOS POR LA COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Las cinco principales clases de contaminantes emitidos por combustión son:

* Profesores del Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia.

- Monóxido de carbono.
- Oxidos de nitrógeno.
- Oxidos de azufre.
- Compuestos orgánicos (hidrocarburos no quemados y parcialmente quemados)
- Particulados (hollín, cenizas muy finas, etc.).

La tabla 1 muestra la contribución relativa de diversas fuentes a la producción de estos contaminantes.

Para un aparato específico de combustión, los niveles de emisión dependen de la interacción entre los procesos químicos y físicos que ocurren dentro de éste.

La formación y destrucción de los contaminantes están íntimamente ligadas con el proceso de combustión ya sea como tal o por la química del contaminante.

Tabla 1. Contribución relativa de diversas fuentes (%)¹

| FUENTE | CO | NOx | SOx | HC | Particulados |
|---------------------------------|------|------|------|------|--------------|
| Transporte | 93.5 | 40.0 | 3.5 | 88.4 | 16.7 |
| Estacionarias. (*) | 1.4 | 59.0 | 96.0 | 2.5 | 72.8 |
| Incinerador de desechos sólidos | 3.4 | 0.5 | 0.3 | 7.4 | 7.5 |
| Otros (**) | 1.7 | 0.5 | 0.2 | 1.7 | 3.0 |

(*) Termoeléctricas. Residencial, comercial, industrial.

(**) Incendios forestales , quemas agrícolas, etc.

1. FORMACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono puede producir la muerte cuando es inhalado en espacios en los cuales no existe adecuada ventilación; este efecto es debido a la reacción que ocurre en la sangre:

Monóxido de Carbono + Hemoglobina → Carboxihemoglobina

El CO es además termoactivo, lo que hace que la parte de él que va a la atmósfera contribuya al calentamiento de la tierra .

De acuerdo con la experimentación se observa que tanto la formación como la destrucción del CO están controlados cinéticamente. Los modelos cinéticos de las reacciones de formación y destrucción de CO se requieren para predecir sus emisiones en cámaras de combustión.

La formación de CO es una de las reacciones principales en el mecanismo de combustión; conociendo un mecanismo cinético para la reacción de combustión en la formación de CO pueden ser calculados los perfiles de concentración de CO. El mecanismo de

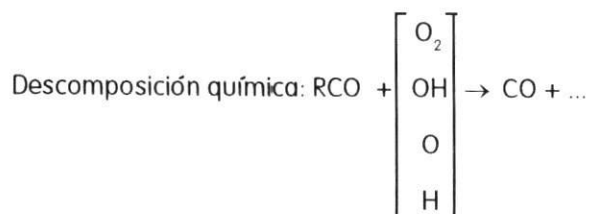
1. Adaptación de la tabla presentada en: BARTOK, William and Adel F. Sorofim. Fossil Fuel Combustion: A Source Book. Ed. John Wiley. EE. UU., 1991.

formación primaria puede ser representado por:



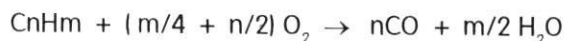
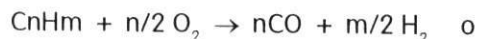
La reacción del radical acyl para producir CO puede ocurrir por :

Descomposición térmica : $RCO \rightarrow CO + R\bullet$
o por

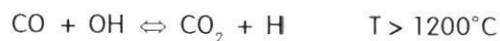


Un modelo usado es el de formación de CO en un paso, denominado MODELO GLOBAL. En dicho modelo el hidrocarburo reacciona con oxígeno molecular formando CO y H_2 o H_2O , cuyas ratas de formación se determinan empíricamente; luego el CO se oxida a CO_2 . De acuerdo con la especie usada para la oxidación del CO los coeficientes de rata de estas reacciones pueden o no depender de la temperatura.

Las reacciones de formación de CO para este modelo son :



Mecanismos de oxidación del CO:



A temperaturas menores de $700^\circ C$ se da el "apagamiento" del CO.

Experimentalmente se ha comprobado que la velocidad de formación de CO es mucho mayor que su velocidad de oxidación.

Existe otro modelo llamado "MODELO DE TIEMPO CARACTERÍSTICO", éste es una aproximación semiempírica hecha para turbinas de gas, en términos de tiempos característicos para los procesos físicos y químicos. Se requiere entonces identificar estos procesos para que sean apropiados y determinar escalas de tiempo adecuadas para dichos procesos. Este modelo es limitado por la necesidad de conocer datos experimentales en el fenómeno de combustión.

La aproximación más simple en un modelo de flujo predictivo para la formación y oxidación de CO es el "MODELO GLOBAL EN DOS PASOS". La formación del CO y H_2 (o H_2O) es el primer paso, determinando la rata empíricamente; el segundo paso es la oxidación del CO cuya rata se calcula usando una ecuación de rata completa.

En la aplicación de los diferentes modelos de formación y oxidación, lo más discutido son los datos de rata de reacción, en donde se considera la reversibilidad de la reacción, el equilibrio, la dependencia de la temperatura, de las concentraciones de los radicales; haciendo estas ecuaciones muy específicas.

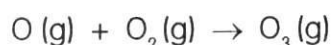
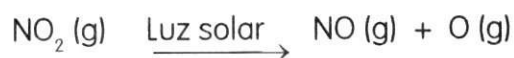
Las emisiones por aparatos de combustión están gobernadas por las ratas de formación y oxidación del CO. Las reacciones de formación tienden a ser rápidas y cuando se opera con exceso de aire las ratas de oxidación en los gases determinan los niveles de CO a la salida; además las concentraciones de los radicales no pueden ser calculadas suponiendo equilibrio a la temperatura local del gas.

La literatura presenta tablas y figuras que muestran modelos cinéticos, coeficientes de rata, expresiones de rata empíricas para la oxidación, reacciones que llevan a la formación de CO en premezclas.

Las emisiones de CO se reducen con temperaturas de combustión por encima de los 700°C y operando con el exceso de aire adecuado. La oxidación hasta CO₂ se logra en los gases de combustión mediante el uso de catalizadores.

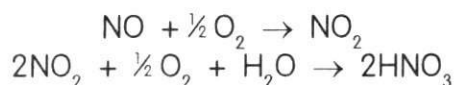
2. FORMACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los NO_x son los promotores de la niebla fotoquímica, mediante las siguientes reacciones :



El O₃ es altamente reactivo con algunos hidrocarburos formando compuestos orgánicos oxigenados (aldehídos y ácidos orgánicos) que son contaminantes tóxicos, muy irritantes para los ojos, piel y vías respiratorias, causan daños en las cosechas y destruyen los materiales.

Los óxidos de nitrógeno contribuyen a la lluvia ácida por la formación de ácido nítrico según las reacciones:



Las emisiones de NO_x por aparatos de combustión comprenden NO, NO₂ y N₂O. Las emisiones de estas especies están gobernadas por las ratas de formación y remoción. La comprensión de la química del nitrógeno en llamas forma la base para el

desarrollo de técnicas de control. Aunque la química juega un papel mayor en emisiones de NO_x, los efectos fluidodinámicos, los cuales alteran las condiciones de llama local, se consideran en proyectos de control de contaminación. De estas emisiones la de mayor importancia es el óxido nítrico (NO).

Las tres principales fuentes de formación de óxido de nitrógeno son:

- Mecanismo térmico de formación de NO
- Formación rápida ("prompt") de NO
- Mecanismo nitrógeno - combustible

La importancia relativa de estas tres fuentes de emisión de NO de un aparato de combustión en particular depende de condiciones de operación y composición del combustible.

En la combustión de combustibles "limpios" (combustibles que no contienen compuestos nitrogenados), el mecanismo "térmico" es la principal causa de emisiones de NO. Sin embargo, cuando el contenido de nitrógeno del combustible aumenta, ocurren contribuciones significativas del mecanismo nitrógeno - combustible para emisiones del NO total. Para contenidos típicos de nitrógeno de aceites combustibles, aceites de esquisto y carbón mineral pulverizado, generalmente el combustible nitrogenado será la principal causa de emisiones de NO.

Para combustibles que contienen nitrógeno, la contribución del NO "rápida" a las emisiones totales de NO de sistemas de combustión convencional es despreciable. Sin embargo, con técnicas mejoradas para reducir emisiones debidas a los mecanismos térmico y nitrógeno - combustible, la importancia de NO "rápida" para las emisiones de NO puede incrementar.

2.1 Formación térmica de NO

El mecanismo de formación térmica tiene tres reacciones principales:



Para el cálculo de la rata de formación de NO se requieren valores de la temperatura local y las concentraciones locales de O, OH, N₂ y O₂ utilizando entonces valores de equilibrio locales de temperatura y concentraciones para dicho cálculo.

La rata de formación de NO es estrechamente dependiente de la temperatura del gas de combustión y un poco más débilmente de la concentración de oxígeno. Los métodos convencionales para el control de emisiones de NO_x producido por el mecanismo térmico, generalmente involucran modificación del proceso de combustión para reducir la temperatura del gas de combustión o la disponibilidad de oxígeno.

La temperatura se puede reducir de varias formas para producir disminuciones significativas de las emisiones de NO_x, pero esta reducción de temperatura puede ocasionar un incremento en las emisiones de CO, lo que es una limitante para el control térmico de NO_x.

2.2 Formación rápida de NO ("prompt")

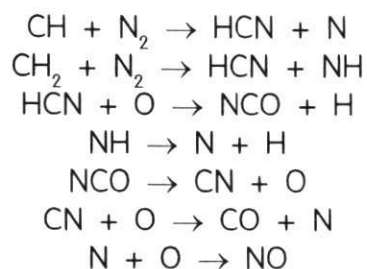
La predicción de ratas de formación de NO próxima a la zona de combustión, requiere unir el proceso de formación de NO a las reacciones de producción de radicales. Existen aproximaciones que permiten hacer esta unión. Una de ellas, la más directa, es

la integración simultánea de las ecuaciones, pero hace necesario conocer de manera detallada el mecanismo de oxidación del combustible y son muy pocos los combustibles cuyo mecanismo es conocido detalladamente.

Se ha trabajado con otros modelos para la rata de formación de NO pero éstos no han predicho correctamente las concentraciones del radical.

Aunque hay incertidumbre con el mecanismo de reacción para la formación rápida de NO, existe consenso en cuanto a que el producto principal de las reacciones iniciales es HCN (o radicales CN) y además la presencia de hidrocarburos es esencial.

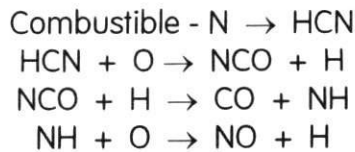
El mecanismo de formación es el siguiente :



2.3 Formación del NO - Combustible

Nitrógeno - Combustible es una causa principal de las emisiones de NO_x en la combustión de combustibles fósiles. El alcance de conversión a NO_x es estrechamente independiente de la identidad del compuesto nitrogenado del combustible de origen, pero es muy dependiente del ambiente local de combustión (temperatura y estequiometría) y de la concentración inicial del combustible nitrogenado en los reactantes.

El mecanismo de formación se presenta a continuación :



Además del NO, el combustible nitrogenado es una de las causas de otras especies gaseosas nitrogenadas tales como HCN y NH₃.

El desarrollo del modelo cinético detallado está impedido porque la identidad y distribución de los tipos químicos de compuestos de nitrógeno en combustibles fósiles no están bien establecidos. Esta duda unida a la falta de datos para los pasos de reacción y coeficientes de rata para pirólisis y oxidación de especies nitrogenadas complejas, requiere la introducción de simplificaciones en el modelo cinético.

Tres métodos para reducir emisiones de NO_x de aparatos de combustión que queman combustibles con alto contenido de nitrógeno combustible son los de etapa de combustión, requema y reducción selectiva de NO en el gas producto, por reacción con NH₂ y otras especies amino. Los modelos cinéticos de estos procesos son útiles en establecer condiciones óptimas para reducción de NO_x.

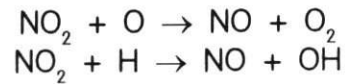
2.4 Formación de NO₂ y N₂O

Durante la combustión el NO formado puede reaccionar con fragmentos de hidrocarburo para formar especies ciano o con especies amino para formar N₂. Además de estas reacciones el NO puede reaccionar con varias especies que contienen oxígeno para formar NO₂. El NO₂ sólo puede existir como una especie transitoria a temperaturas de llama.

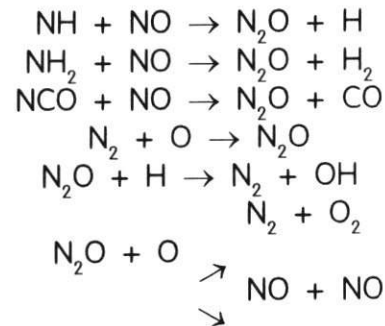
Mecanismo para la formación de NO₂ :

$$\text{NO} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$$


El NO₂ se convierte a NO mediante las reacciones :



Mecanismo para la formación de N₂O :



Las emisiones de NO_x se pueden reducir mediante el uso de combustibles con bajo contenido de nitrógeno, la modificación de diseño y operación de los sistemas de combustión o el tratamiento de los gases de combustión.

Las modificaciones en los sistemas incluyen:

1. *Recirculación del gas de emisión.*
Se regresa una parte a la cámara de combustión para bajar la temperatura de llama y reducir la formación de NO_x térmico.
2. *Quemadores de bajo NO_x.*
Hay baja formación de NO_x térmico y del combustible. Estos quemadores pueden ser catalíticos, de bajo exceso de aire, con aire o combustible en etapas.
3. *Combustión en etapas.*
Una porción de aire se inyecta después de los quemadores, produciéndose una zona de combustión rica en combustible donde se inhibe la formación de NO_x;

completándose posteriormente la combustión en un ambiente rico en aire.

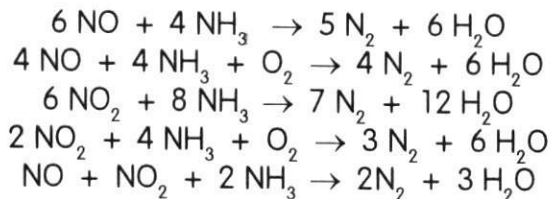
4. *Bajas temperaturas de llama.*

Se logra una considerable reducción de los NOx cuando se opera con temperaturas por debajo de los 900°C, la que se obtiene con inyección de agua líquida o vapor y bajas temperaturas de precalentamiento de aire.

Existen dos tecnologías para el control de los NOx después de haberse formado:

a. *Reducción selectiva catalítica.*

Consiste en inyectar amoníaco anhidro o en solución a la corriente de gas en un lecho de catalizador, reaccionando el amoníaco con los NOx a temperaturas entre 250°C y 400°C, para producir nitrógeno elemental y agua. Las reacciones son:



Los principales componentes de los catalizadores son dióxido de titanio (TiO₂), trióxido de tungsteno (WO₃), pentóxido de vanadio (V₂O₅) y trióxido de molibdeno (MoO₃)

b. *Reducción selectiva no catalítica*

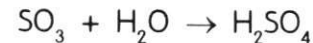
En esta tecnología se inyecta amoníaco o úrea en la salida de la cámara de combustión donde el gas se halle entre 950°C y 1100°C, produciendo nitrógeno y agua mediante las reacciones indicadas en el sistema catalítico.

El principal inconveniente que se presenta en la reducción selectiva consiste en el control de la temperatura. Si este control

no se hace adecuadamente puede llevar a que el amoníaco o la úrea reaccionen más con el oxígeno que con NOx y O₂, formando mayor cantidad de NO. También puede incidir en las emisiones de NH₃ sin reaccionar.

3. FORMACIÓN Y DESTRUCCIÓN DE ÓXIDOS DE AZUFRE (SO_x)

Estos óxidos producen irritación de las vías respiratorias, mareos, somnolencia, dolor de cabeza, vértigo y convulsiones. Además contribuye con la lluvia ácida, cuando se produce ácido sulfúrico, al entrar en contacto con agua :



Los óxidos de azufre constituyen una de las mayores especies contaminantes emitidas por combustión de combustibles fósiles. Su origen es el mismo combustible, cuando contiene componentes azufrados como los carbones, particularmente los bituminosos. Muchos de los compuestos que contienen azufre en aceites combustibles han sido identificados, incluyendo tioles, sulfuros orgánicos, disulfuros y tiofenos. Entre los compuestos que contienen azufre en combustibles gaseosos se incluye H₂S y en cantidades muy bajas CS₂ y COS. El azufre contenido en todos estos combustibles puede ser reducido por procesos físicos y químicos, y la desulfuración del combustible es una de las técnicas principales para el control de emisiones de SOx.

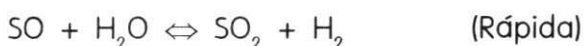
Algunos de los óxidos son especies gaseosas, como SO₂ y SO₃; mientras otros son aerosoles, que comprenden varios sulfatos primarios como H₂SO₄.

Las reacciones de combustibles azufrados y nitrogenados están estrechamente unidas a

las reacciones de oxidación de combustible y los radicales que contienen nitrógeno y azufre compiten por radicales O-H disponible con los radicales de hidrocarburos.

La presencia de especies de azufre tiende a reducir el grupo del radical O-H en la zona de llama. Esta reducción en radicales que contienen O, reducirá las ratas de reacción convirtiendo el nitrógeno molecular a NO por el mecanismo térmico. La presencia de azufre en el combustible puede afectar la selección de la relación de equivalencia óptima de la etapa primaria para el control de NOx.

Mecanismo de formación :



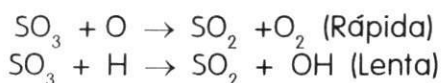
En donde RS : HS, CS, CH₃S, S

La principal reacción de formación del SO₃ es



La velocidad de formación del SO₃ es aproximadamente igual a la velocidad de oxidación del combustible.

Parte del SO₃ se convierte a SO₂ mediante las reacciones



Cuando se opera a temperaturas mayores de 700°C, la concentración del SO₂ es muy superior a la del SO₃.

Operando con temperaturas por debajo de 500°C, la concentración del SO₂ es muy pequeña comparada con la del SO₃.

Las emisiones de SOx se disminuyen bien sea por reducción del azufre del combustible o tratamiento de los gases de combustión. Los compuestos azufrados que contiene el combustible se extraen por métodos físicos y/o químicos; como en el caso de la hidrodesulfuración del carbón y del petróleo, y el endulzamiento del gas natural.

La desulfuración del gas de emisión puede hacerse en húmedo (absorción de SOx en soluciones de NaOH, NH₃, etc.) o en seco (adsorción en carbón activo, arcillas, caliza, óxidos metálicos, etc.)

4. COMPUESTOS ORGÁNICOS ("VOC")

Estas emisiones están constituidas principalmente por :

- Inquemados (del combustible originario). Cuando la mezcla aire - combustible es deficiente, ocasiona una combustión incompleta.
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP : naftaleno, bifenil, pireno, etc.)

4.1 Combustión de alifáticos

Estos hidrocarburos son causantes de la niebla fotoquímica, producen irritación de vías respiratorias, mareos, somnolencia, etc.

Los mecanismos a altas y bajas temperaturas son algo diferentes, reacción característica a baja temperatura es la formación de muchas especies oxigenadas (alcoholes, aldehídos y ácidos). La formación de hidrocarburos olefínicos es otro rasgo de estas reacciones.

A altas temperaturas (700°C) los radicales H, O y OH son los responsables de ramificación de la cadena. Los períodos de ignición e

inducción están controlados por la interacción de las reacciones de ramificación y terminación de la cadena. Una vez se establece la ignición, la propagación de la llama ocurre por ataque del radical que no involucra el combustible.

La formación de hidrocarburos insaturados más altos es una parte integral de las cinéticas de conversión al igual que los hidrocarburos simples a CO , CO_2 , H_2 y H_2O en llama. Esto es cierto especialmente para mezclas ricas en combustible en donde las condiciones sean tales que todo el oxígeno se consume, cesando la ramificación de cadena antes de que los últimos hidrocarburos se oxiden. Estos hidrocarburos por tanto se rompen a través de la zona de reacción primaria en la región de postllama, donde se oxidan lentamente.

4.2 Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son producidos por la mayor parte de los sistemas de combustión. La principal razón para darle importancia a esta clase de compuestos es que algunos miembros son conocidos carcinogénicos, mutagénicos o cocarcinogénicos.

Se han hecho pruebas de mutación bacterial inducidas por un compuesto específico a la vez que para células de sangre humana, mostrando las concentraciones requeridas para fracciones mutantes significativas. Estas pruebas pueden proveer de signos de peligro para posibles efectos en la salud humana, pero no es simplemente una correlación entre mutaciones bacterianas y humanas.

Lo más deseable sería tener conocida la formación y comportamiento de HAP

individuales como funciones de condiciones de combustión; pero la información requerida para esto no se puede medir, y la mayor parte de los HAP son tratados como un grupo. Existe una justificación para esta aproximación: algunas especies HAP pueden ser relativamente favorecidas bajo algunas condiciones y no bajo otras. El conjunto global de clase HAP es relativamente constante a cambios de condiciones.

El *Benzo[a]pireno* es frecuentemente buscado como componente referencia en la caracterización de HAP.

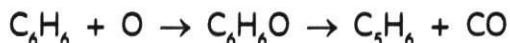
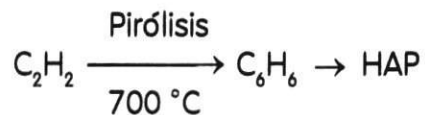
Prácticamente todos los sistemas de combustión son capaces de producir y desprender algún HAP. La mayor causa son los calentadores caseros, especialmente de carbón y leña. El incremento del uso de máquinas diesel en lugar de máquinas de gasolina, conlleva un aumento en emisiones de HAP de diez veces o más.

Se han hecho muchos estudios de HAP en la combustión y pirólisis de hidrocarburos aromáticos y alifáticos, pero las rutas de reacción no quedan muy claras. Una razón para la incertidumbre es que un gran número de HAP están invariablemente presentes al mismo tiempo. Un factor adicional es la formación de hollín en muchos casos. Dentro de las reacciones que ocurren con los HAP se consideran:

- Formación de anillo a partir de alifáticos.
- Formación de aromáticos más pesados que el Benceno.
- Destrucción del Benceno y el HAP.
- Reacciones después de la zona de reacción primaria.

Los mecanismos generales son:

Hidrocarburos alifáticos → Anillos →
Aromáticos más pesados



Las emisiones se reducen cuando se facilita la ruptura del anillo, la fragmentación de la cadena resultante y su posterior oxidación mediante la homogeneización de la mezcla, alta temperatura y adecuado exceso de aire.

5. FORMACIÓN DE HOLLÍN

El hollín es un sólido carbonoso producido en sistemas de combustión y pirólisis cuando las condiciones permiten reacciones de condensación de la fase gaseosa del combustible.

Las emisiones de hollín representan no sólo una pérdida de combustible sino también un peligro para el ambiente y la salud. Una gran variedad de moléculas está frecuentemente asociada con las superficies de las partículas de hollín. Los HAP constituyen una fracción importante de estos hidrocarburos. Las partículas de hollín desprendidas a la atmósfera son fácilmente inhaladas hasta el interior del tracto respiratorio proveyendo el mecanismo ideal de transporte por ingestión de HAP. También reducen de manera considerable la visibilidad atmosférica.

Químicamente el hollín consiste principalmente de carbono pero también contiene cerca del 10% por mol de hidrógeno. El contenido de hidrógeno es más alto en partículas crecientes.

Durante la combustión con formación de hollín se considera la formación y

comportamiento de una fase sólida carbonosa desde una fase gaseosa de especies de hidrocarburos.

La formación de hollín empieza con *nacimiento de partículas*. Una vez las partículas están formadas la cantidad de hollín puede incrementarse *por crecimiento de superficie* el cual involucra la unión de las especies de la fase gaseosa a la superficie de una partícula y su incorporación a la fase particulada. Existe crecimiento por *coagulación*, donde las partículas chocan y se unen formando aglomerados de 0.1 a 1 mm. El crecimiento de la partícula es el resultado de reacción de crecimiento superficial y coagulación simultáneas.

Las etapas de generación y crecimiento de partículas constituyen los procesos de formación de hollín. Este es frecuentemente seguido por una fase de *oxidación* del hollín en la cual el hollín es quemado en la presencia de especies oxidantes para formar productos gaseosos tales como CO y CO₂.

La eventual emisión de hollín de cualquier aparato de combustión dependerá del balance entre los procesos de formación y quemado. Para la formación de hollín se debe considerar la influencia de parámetros como temperatura, estequiometría o el tipo de combustible.

El "límite de hollín" se ha determinado como la estequiometría a la cual aparece el primer hollín en una llama de premezcla. La aparición del hollín como carbono podría ocurrir cuando la relación atómica C/O es uno. Sin embargo este límite ocurre usualmente a valores mucho más bajos. El límite de hollín es también expresado en términos de relación de equivalencia de combustible/aire asumiendo combustión completa a CO₂ y H₂O.

El "punto de humo" se usa como una medida global de las tendencias a formar hollín de

una llama de difusión laminar, representando los efectos netos de formación y quemado integrado a través de la llama. Éste se determina experimentalmente por incremento del flujo de combustible hasta que la llama empieza a emitir humo negro y es reportado como el mínimo flujo de combustible o altura de la llama a la cual esto ocurre.

Las emisiones de hollín se reducen cuando se opera con temperatura lo suficientemente alta y también oxidándolos con OH cuando se tiene una alta relación combustible - aire o con OH y O₂ si la relación es baja.

La adición de metales ionizados puede causar que se carguen las partículas de hollín y así inhibir la coagulación. En las llamas de difusión los aditivos (SO₂, CO₂, H₂, H₂O, N₂, etc.) son utilizados para reducir la tendencia al humo.

CONCLUSIONES

Para controlar las emisiones de contaminantes en los sistemas de combustión es

preciso trabajar tanto con los factores termodinámicos y cinéticos que las afectan como en las condiciones de operación y diseño de los equipos. También están comprometidos el tipo de combustible, la relación aire-combustible usada y las condiciones de mezcla.

Es necesario establecer diferencias, bien sea en un equipo que está en funcionamiento o un nuevo diseño. En el primer caso se buscará obtener una alta eficiencia con unas emisiones mínimas, manejando básicamente condiciones de operación, tipo de combustible, adecuado exceso de aire y correcta homogeneización de la mezcla aire-combustible. En los diseños de equipos nuevos se tendrán en cuenta principalmente factores geométricos que afecten apreciablemente la fluidodinámica, así como el uso de convertidores (catalíticos o no), de tal manera que se garantice el cumplimiento de las normas ambientales a la vez que se saca un alto provecho del combustible.

BIBLIOGRAFIA

- AYEN, Richard J. and Tomo Oyonebayashi. *Catalytic reduction of nitrogen dioxide by carbon monoxide*. Atmospheric Environment. Vol. 1 N° 3. May 1967. pp. 307-318.
- BARTOK, William and Adel F. Sarofim. *Fossil fuel combustion: a source book*. Ed. John Wiley. EE. UU. 1991.
- BURD, Vladimir, *Squeezing clean energy*. Chemical Engineering. pp. 145-150. Vol. 99. March 1992.
- CHO, Soung M. *Properly apply selective catalytic reduction for NOx removal*. Chemical Engineering Progress. Vol. 90. N° 1. January 1994. pp. 39-45.
- GARG, Ashutosh. *Specify better low-NOx burners for furnaces*. Chemical Engineering Progress. Vol. 90. N° 1. January 1994. pp. 46-49.
- McINNES, Robert G. et. al. *Wiping out air pollution*. Chemical Engineering. pp. 106-135. Vol. 97. September 1990.
- WOOD, Stephen C. *Select the right NOx control technology*. Chemical Engineering Progress. Vol. 90 N° 1. January 1994. pp. 32-38.