



Módulo 1:

Generación de Emisiones de SO₂

1. OBJETIVOS	2
2. TEORÍA DE LA COMBUSTIÓN	2
2.1. Definición y Principios Básicos.....	2
2.2. Reacción de Combustión	2
2.3. Tipos de Combustión y su incidencia en la formación de contaminantes.....	2
2.4. Aire Estequiométrico, Exceso de Aire y Coeficiente Lambda (λ).....	3
3. COMBUSTIBLES	4
3.1. Clasificación de los Combustibles	4
3.2. Propiedades de los Combustibles	5
3.3. Combustibles con Azufre	5
4. GENERACIÓN DE CONTAMINANTES	6
4.1. Clasificación de los Contaminantes Atmosféricos	6
4.2. Dióxido de Azufre (SO ₂) como Contaminante Atmosférico	6

1. Objetivos

- Proporcionar una comprensión detallada de los procesos que generan emisiones de dióxido de azufre (SO₂) desde fuentes fijas.
- Analizar los principios de la combustión, los distintos tipos de combustibles utilizados en la industria y cómo estos influyen en la generación de contaminantes.
- Analizar sus impactos ambientales y en la salud humana que convierten al SO₂ en un contaminante crítico, cuya regulación y control son fundamentales para la reducción de la contaminación atmosférica.

2. Teoría de la Combustión

2.1. Definición y Principios Básicos

La combustión es una reacción química de oxidación altamente exotérmica en la que un combustible reacciona con un comburente (normalmente oxígeno), liberando energía en forma de calor y luz. Este proceso es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales, generación de energía, transporte y calefacción residencial.

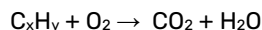
Para que la combustión ocurra, deben estar presentes tres elementos esenciales, conocidos como el "triángulo de fuego":

1. **Combustible:** Material con energía interna capaz de reaccionar rápidamente con el oxígeno.
2. **Comburente:** Mezcla gaseosa con suficiente oxígeno para sostener la reacción (el aire atmosférico contiene aproximadamente un 21% de O₂).
3. **Calor de Activación:** Energía mínima necesaria para iniciar la reacción de combustión.

Cuando estos tres elementos están en proporciones adecuadas y se alcanza la temperatura de ignición, la combustión se mantiene de manera autosostenida.

2.2. Reacción de Combustión

La combustión ideal de un hidrocarburo se puede representar mediante la siguiente ecuación química:



Esta reacción se desarrolla con desprendimiento de calor. Por lo tanto, tiene una entalpía ΔH negativa. Dado que los combustibles utilizados en las fuentes fijas pueden contener otros elementos, como azufre o nitrógeno, además de carbono e hidrógeno, y que la descomposición de los combustibles sólidos también tiene lugar a través de varias etapas intermedias, como la pirólisis, la gasificación y la oxidación, durante la combustión se producen en paralelo varias reacciones individuales, que se presentan a continuación.

2.3. Tipos de Combustión y su incidencia en la formación de contaminantes

Combustión Completa: Se da cuando hay suficiente oxígeno para oxidar completamente todos los elementos del combustible. En este caso, el carbono se convierte en dióxido de carbono (CO₂), el hidrógeno en agua (H₂O) y el azufre en dióxido de azufre (SO₂). La combustión completa es la condición ideal porque minimiza la formación de contaminantes no deseados como el monóxido de carbono (CO) y el hollín.

Algunos ejemplos de reacciones químicas involucradas en la combustión completa son:

- Carbono: $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- Hidrógeno: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$
- Azufre: $S + O_2 \rightarrow SO_2$

Combustión Incompleta: Ocurre cuando la cantidad de oxígeno disponible es insuficiente o las temperaturas de combustión existentes no son lo suficientemente altas, lo que genera productos secundarios como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados y hollín. Esta situación reduce la eficiencia de la combustión y aumenta la emisión de contaminantes perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Algunos ejemplos de reacciones químicas involucradas en la combustión incompleta son:

- Carbono: $2C + O_2 \rightarrow 2CO$
- Azufre: $2S + O_2 \rightarrow 2SO$

Sin embargo, el monóxido de azufre es un gas incoloro que sólo es estable a bajas presiones (< 1 mbar). Por lo tanto, cuando se queman combustibles que contienen azufre, en los gases de escape sólo se encuentran principalmente SO_2 (y pequeñas cantidades de SO_3).

Formación de óxidos de nitrógeno: Además de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre, los combustibles sólidos como el carbón o la biomasa también contienen compuestos de nitrógeno, que forman óxidos de nitrógeno como NO y NO_2 (NO_x) durante la combustión. En el caso de los combustibles fósiles, los óxidos de nitrógeno térmicos se forman debido a las altas temperaturas de combustión provocadas por la oxidación del nitrógeno del aire de combustión suministrado. En el caso de la combustión de biomasa, las temperaturas de combustión son más bajas, por lo que la formación de óxidos de nitrógeno se produce principalmente a través del nitrógeno contenido en el combustible.

Algunos ejemplos de reacciones químicas involucradas en la oxidación de nitrógeno son:

- Nitrógeno en el combustible: $NH + O \rightarrow NO + H$
- Óxido de nitrógeno térmico: $N_2 + O \rightarrow NO + N$
- $N + O_2 \rightarrow NO + O$

NO se forma principalmente en los gases de escape procedentes de los procesos de combustión. Cuando los gases de escape se mezclan con la atmósfera, el NO se oxida a NO_2 . Por este motivo, en las mediciones de emisiones y los valores límite se calcula la suma de NO y NO_2 para especificar el valor de NO_x .

2.4. Aire Estequiométrico, Exceso de Aire y Coeficiente Lambda (λ)

Para una combustión eficiente, es fundamental que exista una proporción exacta de aire respecto al combustible, lo que se conoce como **aire estequiométrico**. En la práctica, sin embargo, se suele utilizar un **exceso de aire** para asegurar que la combustión sea completa y evitar la formación de contaminantes indeseados.

El coeficiente **lambda (λ)** se define como la relación entre el aire real suministrado y el aire estequiométrico necesario para la combustión completa:

- Si $\lambda=1$, la combustión es estequiométrica.

- Si $\lambda > 1$, hay un exceso de aire (combustión con exceso de oxígeno).
- Si $\lambda < 1$, hay un déficit de aire, lo que provoca combustión incompleta.

El rango de valores de lambda comúnmente utilizados en procesos de combustión varía según la aplicación:

- **Motores de gasolina:** (mezcla estequiométrica o ligeramente rica/pobre).
- **Motores diésel:** (mezcla pobre con exceso de aire para mejorar la eficiencia).
- **Calderas y hornos industriales:** (optimización entre eficiencia y reducción de emisiones contaminantes).

Un exceso de aire demasiado alto puede reducir la temperatura de combustión y disminuir la eficiencia energética del proceso. Por otro lado, un déficit de aire puede generar combustión incompleta y aumentar las emisiones de contaminantes.

3. Combustibles

Los combustibles son materiales que, al reaccionar con un comburente (generalmente oxígeno), generan una reacción exotérmica que libera calor, energía y, en algunos casos, luz. Este proceso es fundamental para la generación de electricidad, la propulsión de vehículos y el funcionamiento de diversas industrias. Dependiendo de su composición y características físicas, los combustibles pueden presentar distintas eficiencias energéticas y niveles de emisión de contaminantes.

Uno de los principales impactos ambientales asociados al uso de combustibles es la generación de contaminantes atmosféricos. Entre ellos, el **dióxido de azufre (SO₂)** es especialmente relevante, ya que proviene de la combustión de combustibles que contienen azufre en su composición, como el carbón, el diésel y el fuel oil. Este gas es un precursor de la lluvia ácida y del material particulado fino (PM2.5), ambos con graves efectos sobre la calidad del aire, la salud humana y los ecosistemas.

La composición química de un combustible determina la cantidad y el tipo de contaminantes emitidos durante su combustión. Mientras que los combustibles con bajo contenido de azufre generan menores cantidades de SO₂, aquellos con mayores concentraciones de este elemento requieren tecnologías de reducción de emisiones para minimizar su impacto ambiental. En respuesta a estos desafíos, se han implementado regulaciones ambientales estrictas y tecnologías de desulfurización para limitar la presencia de azufre en los combustibles y reducir la contaminación asociada a su uso.

3.1. Clasificación de los Combustibles

Los combustibles se pueden clasificar según distintos criterios:

3.1.1. Según su Estado Físico

- Sólidos: Carbón, biomasa (leña, pellets, residuos agrícolas).
- Líquidos: Derivados del petróleo como gasolina, diésel y fuel oil.
- Gaseosos: Gas natural, biogás, hidrógeno.

3.1.2. Según su Origen

- Fósiles: Formados por procesos geológicos a lo largo de millones de años (petróleo, gas natural, carbón).
- Biomásicos: Procedentes de fuentes renovables como residuos vegetales y orgánicos.

3.1.3. Según su Forma de Obtención

- Naturales: Se encuentran en la naturaleza y requieren poco procesamiento (gas natural, carbón).
- Sintéticos o Refinados: Obtenidos mediante procesos industriales a partir de fuentes naturales (gasolina, diésel, queroseno, biodiésel).

3.2. Propiedades de los Combustibles

Las características físicas y químicas de los combustibles determinan su eficiencia y el impacto ambiental de su combustión.

- **Poder Calorífico:** Energía liberada por unidad de masa o volumen del combustible.
- **Composición (Análisis Elemental):** Determina la proporción de carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), nitrógeno (N) y oxígeno (O) en el combustible.
- **Composición (Análisis Proximal):** Evalúa la humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo, factores importantes en combustibles sólidos como el carbón y la biomasa.
- **Densidad:** Relación entre la masa y el volumen. Influye en el almacenamiento y transporte.
- **Viscosidad:** Resistencia de los combustibles líquidos al flujo, afectando su manipulación e inyección en motores y calderas.
- **Temperatura de Ignición:** Temperatura mínima necesaria para iniciar la combustión.
- **Temperatura de Inflamabilidad:** Temperatura mínima a la que un combustible desprende vapores inflamables en contacto con aire.

3.3. Combustibles con Azufre

El contenido de azufre en los combustibles es un factor clave en la generación de dióxido de azufre (SO₂). Durante la combustión, el azufre reacciona con el oxígeno, formando SO₂, uno de los principales contaminantes del aire.

3.3.1. Principales Combustibles con Alto Contenido de Azufre

Carbón:

El carbón es uno de los combustibles fósiles con mayor variabilidad en su contenido de azufre. En particular, el sub-bituminoso y el lignito presentan concentraciones de azufre que pueden oscilar entre el 0,5% y el 5%, dependiendo de su origen geológico. Su combustión en centrales termoeléctricas y procesos industriales representa una de las mayores fuentes de emisión de SO₂ a nivel global.

Fuel Oil

Es un derivado pesado del petróleo ampliamente utilizado en industria, generación eléctrica y transporte marítimo. Su contenido de azufre puede ser significativo, oscilando entre el 0,5% y más del 3% en sus versiones más densas y menos refinadas. Debido a su impacto ambiental y a su uso habitual en la industria náutica, la Organización Marítima Internacional (OMI) implementó en 2020 la regulación IMO 2020, que exige una reducción drástica en el contenido de azufre de los combustibles marinos, estableciendo un límite del 0,5% de azufre en combustibles utilizados en el transporte marítimo.

Diésel y Gasolina

Históricamente, el diésel y la gasolina contenían cantidades significativas de azufre. Sin embargo, las regulaciones ambientales han impulsado la adopción de combustibles de ultra bajo azufre (ULSD, por sus siglas en inglés), reduciendo su contenido a menos del 0,0015% (15 ppm). Esta reducción ha sido clave en

la disminución de emisiones de SO₂ en sectores de transporte terrestre y maquinaria pesada, mejorando la calidad del aire en entornos urbanos e industriales.

Petróleo Crudo y sus Derivados

El petróleo crudo contiene azufre en diferentes concentraciones dependiendo de su origen geológico. Se clasifica en crudos dulces (sweet crude), con bajo contenido de azufre (<0,5%), y crudos ácidos (sour crude), con niveles de azufre superiores al 1%. Durante el proceso de refinación, se aplican tecnologías de hidrodesulfuración para reducir su contenido de azufre y producir combustibles más limpios.

El uso de combustibles con azufre ha sido una fuente significativa de contaminación atmosférica. Las regulaciones ambientales han impulsado la reducción del contenido de azufre en los combustibles fósiles y la adopción de tecnologías de control de emisiones, como filtros de gases y sistemas de desulfurización. Para mitigar el impacto del SO₂, es fundamental optar por combustibles más limpios y tecnologías eficientes en la combustión.

4. Generación de Contaminantes

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de compuestos gaseosos, partículas en suspensión, formas de energía o vibraciones en concentraciones suficientes para generar efectos adversos en la salud humana, la biodiversidad, los materiales y el clima.

4.1. Clasificación de los Contaminantes Atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos se clasifican según distintos criterios:

4.1.1. Según su Origen

- **Naturales:** Emitidos por fuentes como volcanes, incendios forestales, erosión del suelo, oleaje marino y procesos biológicos.
- **Antropogénicos:** Proviene de actividades humanas como la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales, transporte y generación de energía.

4.1.2. Según su Composición

- **Gaseosos:** Incluyen dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV).
- **Partículas en suspensión:** Se clasifican en material particulado respirable (PM₁₀) y material particulado fino (PM_{2,5}), compuestos por mezclas de sólidos y gotas líquidas en el aire.

4.1.3. Según su Formación

- **Contaminantes Primarios:** Son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera desde fuentes fijas o móviles. Ejemplos incluyen SO₂, CO, NO_x y partículas sólidas.
- **Contaminantes Secundarios:** Se forman en la atmósfera mediante reacciones químicas entre contaminantes primarios. Ejemplos incluyen ácido sulfúrico (H₂SO₄) generado a partir del SO₂, el ozono troposférico (O₃) y partículas secundarias.

4.2. Dióxido de Azufre (SO₂) como Contaminante Atmosférico

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro con un olor penetrante y una densidad superior al aire, lo que facilita su permanencia en la atmósfera. Es no inflamable, pero altamente reactivo y soluble en agua, donde puede formar ácido sulfúrico (H₂SO₄).

4.2.1. Efectos del SO₂

- **Salud Humana:** Provoca irritación en ojos, nariz y vías respiratorias. La exposición prolongada puede causar inflamación pulmonar, tos, dificultad respiratoria y agravar enfermedades como el asma.
- **Precursor de Partículas Finas (PM2.5):** El SO₂ en la atmósfera puede reaccionar con otros compuestos para formar sulfatos, un componente clave del material particulado fino, que tiene graves efectos en la calidad del aire.
- **Impacto en Materiales y Ecosistemas:**
 - **Lluvia Ácida:** El SO₂ se oxida en la atmósfera y reacciona con el agua, formando ácido sulfúrico. Este compuesto precipita con la lluvia, afectando suelos, cuerpos de agua y estructuras construidas.
 - **Corrosión de Materiales:** La lluvia ácida degrada edificaciones y monumentos de piedra caliza y mármol, además de corroer estructuras metálicas.